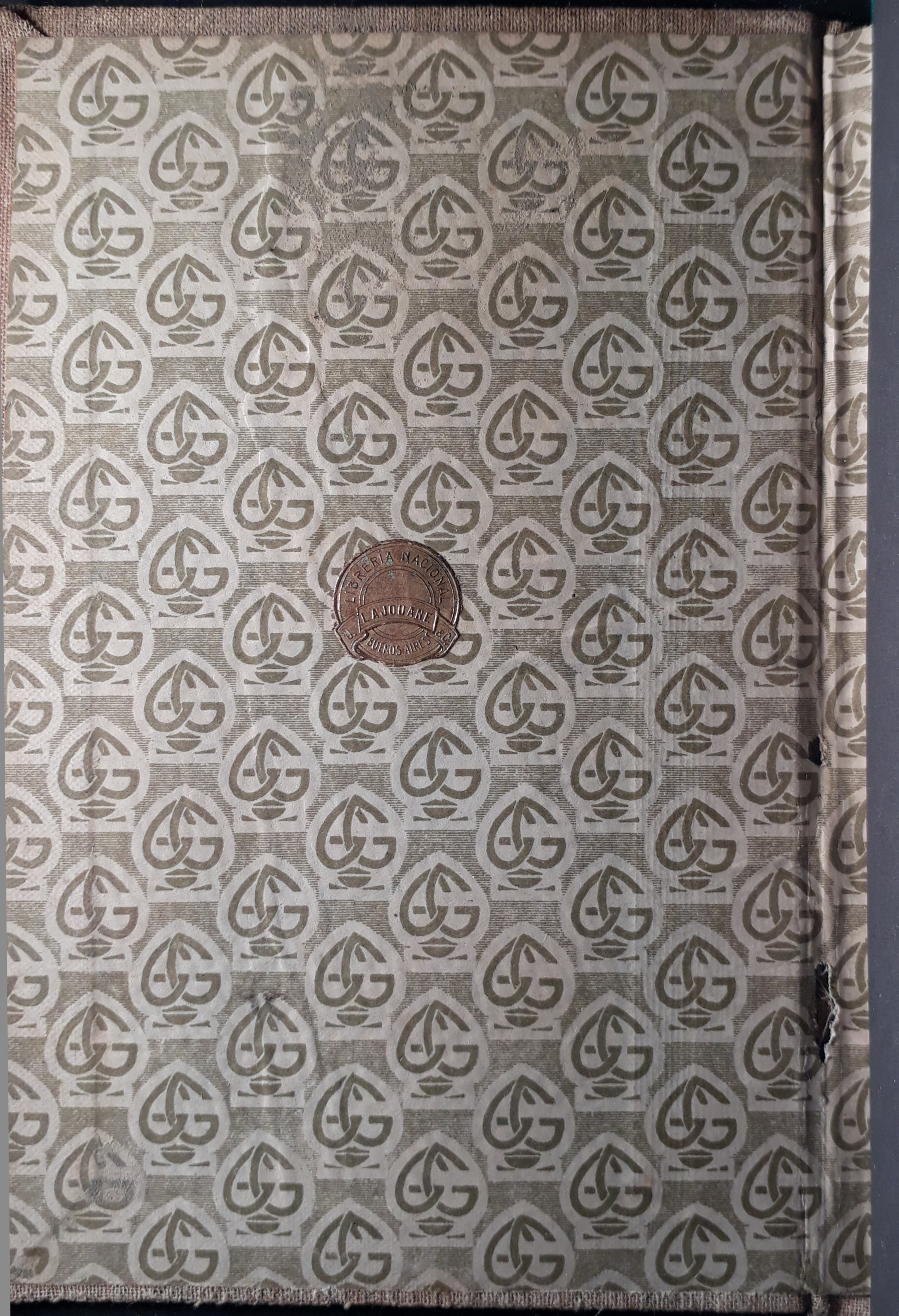
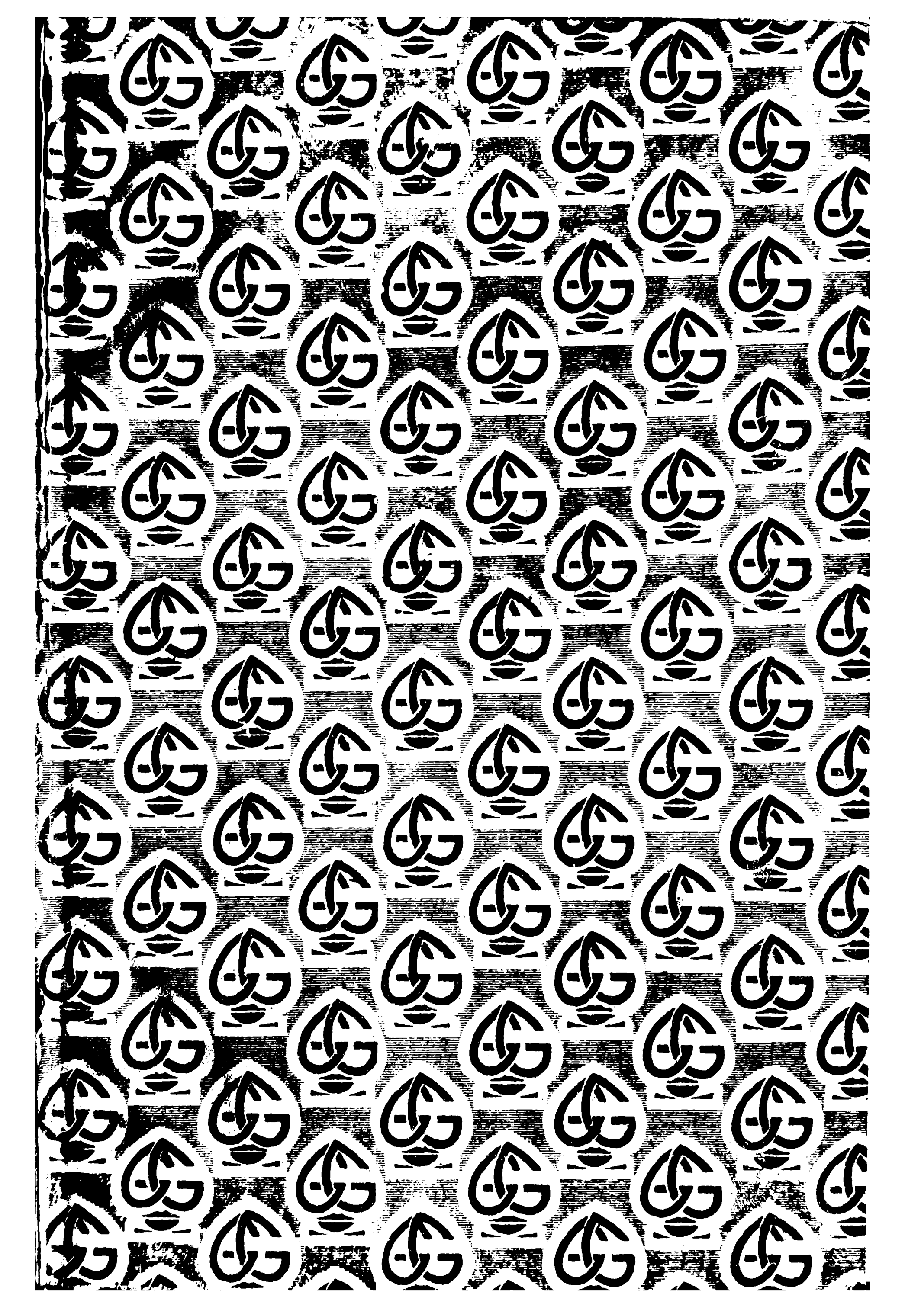
P. Roberjot

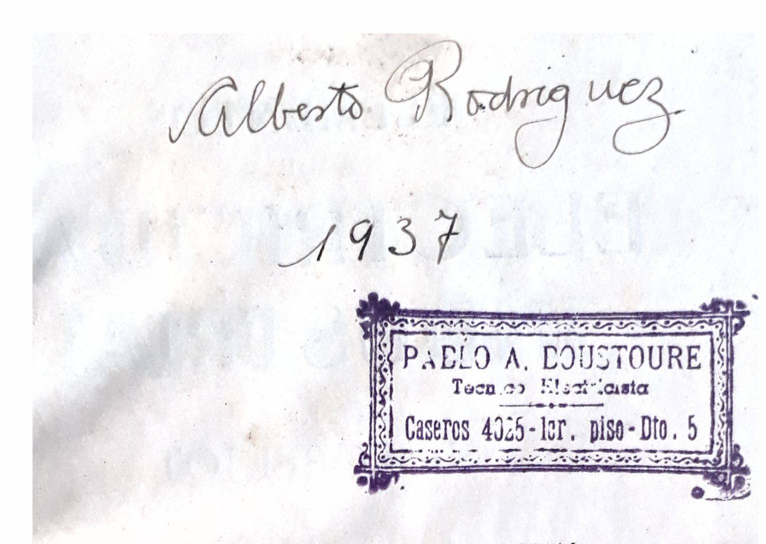
ELECTRICIDAD INDUSTRIAL



I. Generalidades


LIBRERIA NACIONAL
J. LAJOUANE &C.
BUENOS AIRES





ELEMENTOS DE ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

I

GENERALIDADES

ELEMENTOS
DE
ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

POR

P. ROBERJOT

TOMO I
GENERALIDADES

TOMO II
MEDIDAS ELÉCTRICAS INDUSTRIALES

TOMO III
MÁQUINAS ELÉCTRICAS

TOMO IV
INSTALACIONES INTERIORES
TIMBRES : TELÉFONOS : ALUMBRADO
MOTORES

TOMO V
CENTRALES Y REDES

BARCELONA
GUSTAVO GILI, EDITOR
Calle de Enrique Granados, 45

ELEMENTOS
DE
ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

POR

P. ROBERJOT

PROFESOR DE LA ESCUELA INDUSTRIAL DE REIMS

VERSIÓN POR

JOSÉ M.ª MANTERO

LICENCIADO EN CIENCIAS

TOMO I

GENERALIDADES

4.ª EDICIÓN
Revisada y aumentada



BARCELONA
GUSTAVO GILI, EDITOR
Calle de Enrique Granados, 45
MCMXXXV

GUINART Y PUJOLAR, impresores; Bruch, 63. — BARCELONA

CAPÍTULO PRIMERO

Energía.—Sus formas.—Su medida. Sus propiedades

Dos principios esenciales rigen a todos los fenómenos físicos, y en ellos está fundado el estudio de la electricidad. Estos principios son:

El principio de la conservación de la energía y el de la degradación de la energía.

Por consiguiente, es preciso ante todo:

1.º Examinar lo que se entiende por energía y estudiar las diferentes formas en que se presenta.

2.º Definirla como magnitud y estudiar las unidades que permiten medirla.

Energía

Se dice que un cuerpo o un sistema de cuerpos tiene energía cuando es capaz de efectuar un trabajo. Esta energía puede existir en el cuerpo en estado actual o cinética, o en estado potencial.

Energía actual o cinética.—Es la que poseen los cuerpos en movimiento; se encuentra en la naturaleza, producida por los saltos de agua, los vientos, las mareas, etc. En este estado se puede utilizar más o menos fácilmente, es decir, hacer que efectúe el tra-

bajo que se necesita, pero este trabajo ha de efectuarse en el sitio y en el momento mismo en que se produce la energía.

Energía potencial. — Es la que existe en estado latente en ciertos cuerpos o sistemas de cuerpos en reposo, y puede aparecer en estado de energía actual, esto es, utilizarse en un momento y en un lugar cualquiera. Para que se produzca esta transformación en trabajo, basta con un pequeño consumo de energía primitiva.

Consideremos, por ejemplo, una cierta cantidad de carbón: el sistema de cuerpos formado por el carbón y el oxígeno del aire, posee una energía potencial. En efecto, bastará elevar una parte de este carbón a una temperatura conveniente para que la combustión, o sea, la combinación con el oxígeno, se produzca en toda la masa; esta combustión permite evaporar el agua de una caldera y poner en movimiento una máquina de vapor que producirá el trabajo. La energía primitiva que se ha necesitado gastar para transformar en trabajo la energía potencial del sistema carbón-oxígeno está representada por la cantidad de calor necesaria para elevar una pequeña cantidad del carbón a una temperatura suficiente para producir la combustión.

Diferentes formas de la energía. — Sabemos que pueden ponerse en movimiento las máquinas de una fábrica, es decir, producir un trabajo, por medio de un salto de agua, o utilizando el calor producido por la combinación química de dos cuerpos, carbono y oxígeno (máquina de vapor), o por medio de un motor eléctrico alimentado por una corriente. Por consiguiente, el salto de agua, el calor, los fenómenos quí-

micos, la corriente eléctrica, son manifestaciones de la energía. Decimos que la energía puede tomar las distintas formas siguientes:

Energía mecánica;
» térmica;
» química;
» eléctrica.

Transformaciones de la energía.—En la naturaleza encontramos materia y energía.

Para utilizar convenientemente la materia tenemos que transformarla; por ejemplo, los minerales hay que transformarlos en metales, las piedras calcáreas en cales, etc. Análogamente, la forma en que se presenta la energía ha de transformarse para ser utilizable.

La posibilidad de esta transformación la vemos en el ejemplo de la máquina de vapor de que hemos hablado. En efecto, vimos que la energía potencial *química* del sistema carbono-oxígeno se transformaba en energía *térmica,* y ésta, a su vez, en energía *mecánica*. Esta máquina puede mover una dinamo que dará energía *eléctrica*. Pero sabemos que esta transformación necesita una cierta complejidad de aparatos y que se efectúa bajo la condición de perder una gran cantidad de la energía puesta en juego, el 90 por 100 aproximadamente.

Propiedades particulares de la energía eléctrica.— Es evidente que si existiera una forma especial de la energía en la cual pudiera transformarse otra forma cualquiera con pocas pérdidas y que aquella forma fuera a su vez económicamente transformable en otra cualquiera, sería de un valor considerable bajo todos los aspectos.

Esta forma existe y es la energía eléctrica; en efecto, ya veremos en el curso de este tratado cómo

la energía química y la energía mecánica se transforman en energía eléctrica (pilas, acumuladores, dinamos), y que la energía eléctrica se transforma igualmente en energía mecánica (electromotores), en energía térmica (alumbrado y calefacción eléctricos), en energía química (electrolisis, electrometalurgia).

A esta propiedad de intermediario entre dos formas de la energía, une la de permitir un transporte fácil de la energía de un punto a otro. Nadie ignora, en efecto, que se puede transportar la energía producida por un salto de agua y transformada previamente en energía eléctrica a cientos de kilómetros, y utilizarla, en su punto de llegada, bajo diferentes formas.

Esta ligera exposición de las propiedades de la energía eléctrica basta para hacernos comprender la importancia del papel que desempeña en la industria, la rapidez con que su empleo se extiende y el desarrollo considerable que ha de tomar en lo sucesivo.

La energía, magnitud conmensurable. — Unidades

Hemos visto que cualquiera que sea la forma bajo la cual se presenta la energía, es siempre susceptible de transformarse en trabajo mecánico; y si se toman unidades de energía diferentes para cada una de estas formas, podrán expresarse en unidades de trabajo. Por consiguiente, es preciso definir en primer lugar la magnitud *trabajo*.

Para ello consideremos una máquina de vapor, que nos da un ejemplo manifiesto de producción de trabajo. Se sabe que el vapor que llega al cilindro ejerce sobre el pistón una fuerza que tiene por valor numérico el producto de su presión por la superficie del pistón. Bajo la acción de esta fuerza el pistón se mueve y el trabajo producido durante un tiempo dado depende de la

intensidad de la fuerza y del movimiento del pistón durante este tiempo.

Por definición, el trabajo producido por una fuerza cuyo punto de aplicación se mueve en su misma dirección es igual al producto de esta fuerza por el camino recorrido por dicho punto.

Kilográmetro.—Siendo la unidad práctica de fuerza el *kilogramo* y la unidad de longitud el *metro,* la unidad de trabajo es el trabajo producido por una fuerza de un kilogramo que traslada en su dirección su punto de aplicación, un metro. Esta unidad se llama *kilográmetro.*

Joule.—Por razones que no son de este lugar, se ha adoptado para medir la energía bajo forma eléctrica otra unidad: el *joule,* cuyo valor es tal, que 1 kilográmetro equivale a 9,81 joules.

Por consiguiente, 1 joule vale:

$$\frac{1}{9{,}81} = 0{,}102 \text{ kilográmetros.}$$

Caloría.—La energía bajo forma de calor se mide en calorías.

La *caloría* es la cantidad de calor necesaria para elevar 1° la temperatura de un kilogramo de agua.

Se llama también a esta unidad *caloría grande,* dándose el nombre de *caloría pequeña* a la cantidad de calor necesaria para elevar 1° la temperatura de un gramo de agua.

Por lo tanto, la caloría grande equivale a 1000 calorías pequeñas.

Los notables trabajos de Joule, Hirn y otros físicos eminentes han demostrado que una caloría grande transformada en trabajo produce 425 kilográmetros,

o también, que cuando el trabajo mecánico se transforma en calor es preciso gastar 425 kilográmetros para producir una caloría.

Relación entre 1 joule y 1 caloría.—Acabamos de ver que:

$$1 \text{ kilográmetro} = 9{,}81 \text{ joules}$$

y que:

$$1 \text{ caloría} = 425 \text{ kilográmetros;}$$

por consiguiente:

$$1 \text{ caloría} = 425 \times 9{,}81 = 4\,180 \text{ joules;}$$

de donde:

$$1 \text{ caloría pequeña} = 4{,}18 \text{ joules,}$$

$$1 \text{ joule} = \frac{1}{4{,}18} = 0{,}24 \text{ calorías pequeñas.}$$

Potencia.—Se llama *potencia de una máquina* al trabajo que puede producir en un segundo.

Una máquina tendrá una potencia igual a la unidad cuando efectúe en un segundo la unidad de trabajo, y habrá tantas unidades de potencia como unidades de trabajo. Las principales son:

a) El *kilográmetro por segundo.*

b) El *caballo de vapor,* que es la potencia de una máquina que puede efectuar un trabajo de 75 kilográmetros por segundo. Se ha intentado sustituir esta unidad por:

c) El *poncelet,* potencia de una máquina que produce 100 kilográmetros por segundo;

d) El *watt,* potencia de una máquina que puede producir un trabajo de 1 joule en 1 segundo; sus múltiplos son: el *hectowatt* y el *kilowatt.*

Las únicas unidades que se emplean en la práctica son el caballo y el watt, con sus múltiplos.

Relación entre 1 caballo y 1 watt.—Sabemos que

$$1 \text{ kilográmetro} = 9{,}81 \text{ joules};$$

por consiguiente:

$$1 \text{ caballo de vapor} = 75 \times 9{,}81 = 736 \text{ joules por segundo},$$

pero se tiene que

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule por segundo},$$

o sea, que

$$1 \text{ caballo de vapor} = 736 \text{ watts}$$

y:

$$1 \text{ watt} = \frac{1}{736} \text{ caballo},$$

o también,

$$1 \text{ kilowatt} = \frac{1000}{736} = 1{,}36 \text{ caballos}.$$

Unidades de trabajo derivadas de las unidades de potencia. — Según la definición de potencia de una máquina, el número que mide el trabajo producido por esta máquina en un tiempo dado es igual al producto del número que expresa la potencia por el número que expresa el tiempo.

Por consiguiente, si se toma como unidad de tiempo la *hora* y como unidad de potencia el caballo de vapor o el watt, se tienen las dos unidades de trabajo o de energía más empleadas en la práctica: el *caballo-hora* y el *watt-hora* con sus múltiplos el *hectowatt-hora* y el *kilowatt-hora*.

El caballo-hora es el trabajo que efectúa en una hora una máquina cuya potencia es de un caballo de vapor.

El watt-hora es el trabajo efectuado en una hora por una máquina cuya potencia es de un watt.

Resulta, por lo tanto, que un caballo de vapor produce en un segundo 75 kilográmetros, luego en una hora producirá 75 × 3600 kilográmetros.

Esto es:

$$1 \text{ caballo-hora} = 75 \times 3600 = 270000 \text{ kilográmetros.}$$

Es evidente que:

$$1 \text{ watt-hora} = 3600 \text{ watt-segundos o joules.}$$

Las principales unidades prácticas de trabajo o energía y de potencia son las siguientes:

Trabajo o *energía* Fuerza por longitud o: Potencia por tiempo	Kilográmetro.		
	Joule	1 kilográmetro	= 9,81 joules.
		1 joule	= 0,102 kilográmetros.
	Caloría	1 caloría grande	= 4180 joules.
		1 joule	= 0,24 calorías pequeñas.
	Caballo-hora		= (75 × 3600) kilográmetros.
	Watt-hora		= 3600 joules.
Potencia	Kilográmetro por segundo.		
	Caballo de vapor,	1 caballo =	75 kilográmetros por seg.; 736 watts.
	Poncelet......	1 poncelet =	100 kilográmetros por seg.
	Watt.............	1 watt =	1 joule por seg.
		1 kilowatt =	1,36 caballos de vapor.

Aplicación. — *La sección del cilindro de una máquina de vapor es de 800 centímetros cuadrados; la carrera del pistón es de 60 centímetros; la velocidad es de 95 vueltas por minuto; la presión media del vapor en el cilindro es de 2,5 Kg. por centímetro*

cuadrado. Se emplea carbón cuya potencia calorífica es de 8000 calorías.

Deducir de estos datos la potencia de la máquina en caballos y el consumo de carbón por hora, sabiendo que sólo el 10 por 100 de la energía potencial del carbón se transforma en trabajo mecánico.

El valor medio de la fuerza que actúa sobre el pistón durante su movimiento es:

$$800 \times 2{,}5 = 2000 \text{ kilogramos.}$$

El pistón recorre 0,60 m. en una carrera o embolada; luego el trabajo efectuado durante ese tiempo será:

$$2000 \times 0{,}60 = 1200 \text{ kilográmetros.}$$

La duración de este trabajo es la de media rotación de la máquina, pues el pistón recorre dos veces el cilindro por cada rotación.

Siendo la velocidad de 95 vueltas por minuto, o sea $\frac{95}{60}$ por segundo, la duración de una rotación es $\frac{60}{95}$ y la de media rotación o de una carrera es de $\frac{30}{95}$ segundos.

El trabajo de la máquina por segundo, que es su potencia, es por lo tanto:

$$\frac{1200}{\frac{30}{95}}, \text{ o bien } \frac{1200 \times 95}{30} = 3800 \text{ Kgms. por segundo,}$$

o sea

$$\frac{3800}{75} = 50 \text{ caballos.}$$

Esta potencia, expresada en watts, tiene por valor:

$$50 \times 736 = 36800 \text{ watts.}$$

El trabajo efectuado por segundo es de 36800 joules y en una hora:

$$36800 \times 3600 = 132480000 \text{ joules.}$$

Ahora bien, 1 caloría equivale a 4180 joules; luego para producir este trabajo es preciso gastar

$$\frac{132480000}{4180} = 31693 \text{ calorías.}$$

Para producir el trabajo correspondiente a 10 calorías hay que emplear 100; por consiguiente, será necesario, en realidad, para efectuar el trabajo de 132480000 joules, gastar 316930 calorías, y como un kilogramo de carbón da 8000 calorías, el peso de carbón consumido en una hora es de:

$$\frac{316930}{8000} = 39 \text{ kilogramos.}$$

Conservación de la energía

En todas las transformaciones que la energía puede sufrir, una cierta cantidad de ella queda siempre idéntica a sí misma en magnitud, esto es, no puede aumentar ni disminuir. También se expresa este hecho diciendo que la energía no puede crearse ni destruirse.

Tomemos por ejemplo el caso de la transformación en trabajo mecánico de la energía química que representa, en presencia del aire, un kilogramo de esencia de petróleo. Se sabe que su combustión produce 11000 calorías, y, por consiguiente, esta energía equivale a:

$$11000 \times 425 = 4675000 \text{ kilográmetros.}$$

Utilicemos el litro de esencia en un motor de explosión; la experiencia demuestra que se podrán recoger

bajo la forma de trabajo mecánico 900000 kilográmetros; si se midiera al mismo tiempo la cantidad de calor que se produce, se encontrarían 8880 calorías, correspondientes a un trabajo de:

$$8880 \times 425 = 3775000 \text{ kilográmetros,}$$

y se tiene que:

$$900000 + 3775000 = 4675000.$$

Y finalmente:

4675000 kilográmetros	=	900000	+	3775000
Energía total comunicada al motor		Trabajo mecánico producido		Energía térmica

De un modo general, sea $\mathcal{T}$ kilográmetros la energía comunicada a una máquina. Esta energía se transformará en trabajo mecánico, calor, etc.; supongamos que se pueda medir la energía que aparece bajo cada una de estas formas, y sean $\mathcal{T}_1$, $\mathcal{T}_2$, $\mathcal{T}_3$,... sus valores calculados también en kilográmetros; se tendrá:

$$\mathcal{T} = \mathcal{T}_1 + \mathcal{T}_2 + \mathcal{T}_3 + \dots$$

Degradación de la energía

Cuando para las necesidades de una industria cualquiera se emplean máquinas, el objeto de éstas es transformar la energía de que se dispone, en una forma bajo la cual se quiere utilizar. El valor de la energía utilizable que así se obtiene es siempre inferior al de la energía que se ha empleado. Una cierta cantidad no puede recogerse, esto es, se pierde prácticamente; de modo que, según el principio de la conservación de la energía, se puede escribir:

Energía comunicada a la máquina = Energía utilizable recogida + Energía perdida.

Por consiguiente, cada vez que la energía se transforma hay una pérdida de energía utilizable, o sea una *disminución* de energía. Esta disminución se presenta siempre bajo la forma de calor.

Pero el valor de estas pérdidas es variable, y en grandes proporciones, con la forma de la energía primitiva que se quiere transformar.

Cuando se transforma la energía eléctrica en mecánica, o inversamente, la energía mecánica en eléctrica, las pérdidas no pasan del 20 al 25 por 100 y se reducen en las grandes máquinas al 3 por 100.

Cuando, al contrario, se transforma el calor en trabajo, las pérdidas llegan hasta el 95 por 100 y raramente bajan del 85 por 100; si se transforma directamente en electricidad, las pérdidas son del orden del 99 por 100.

Por último, cuando la energía se presenta bajo la forma de calor a baja temperatura no es transformable prácticamente en trabajo mecánico.

Existe, por lo tanto, una especie de jerarquía en las diferentes formas de la energía: el trabajo mecánico y la electricidad son las formas superiores, el calor es una forma inferior y el calor a baja temperatura es inferior a todas las demás formas de la energía.

Ahora bien, hemos visto que cada vez que la energía cambia de forma, una cierta parte se convierte en calor a baja temperatura, esto es, en la forma inferior de la energía; en una palabra, sufre una degradación.

Rendimiento de una máquina. — Se llama rendimiento de una máquina a la relación entre la energía utilizable recogida y la energía total que se le ha comunicado:

$$\text{rendimiento} = \frac{\text{energía utilizable recogida}}{\text{energía total comunicada}},$$

o también

$$\text{rendimiento} = \frac{\text{energía comunicada} - \text{pérdidas}}{\text{energía comunicada}}.$$

Si se consideran los valores de la energía recogida y de la energía comunicada durante la unidad de tiempo, se tiene:

$$\text{rendimiento} = \frac{\text{potencia utilizable recogida}}{\text{potencia comunicada a la máquina}}.$$

Según lo que hemos dicho, las máquinas eléctricas tienen generalmente rendimientos del 70 al 97 por 100 y las máquinas térmicas rendimientos del 5 al 15 por 100.

CAPÍTULO II

Electricidad estática

Definición. — Algunos cuerpos, al frotarlos, adquieren ciertas propiedades, que conservan indefinidamente si no interviene ninguna causa exterior; así, por ejemplo, atraen a los cuerpos próximos. Se expresa este hecho diciendo que están *electrizados* (de la palabra griega *elektron,* ámbar, sustancia en que se observó este fenómeno por primera vez).

Para explicar las diferentes acciones debidas a este estado particular de los cuerpos electrizados, se ha admitido que el frotamiento desarrolla un flúido que permanece sobre los cuerpos y que se ha llamado *electricidad,* y se dice que dichos cuerpos poseen cierta *cantidad* o cierta *carga* de electricidad.

El estudio de los fenómenos producidos por esta electricidad que así se halla en estado de equilibrio sobre ciertos cuerpos, constituye la *electrostática*.

Existencia de dos clases de electricidad.—Todos los cuerpos electrizados se comportan, o bien como el vidrio frotado, o bien como la resina frotada, los cuales dan lugar a efectos diferentes; de ello se deduce que hay dos clases de electricidad. Para diferenciarlas, se ha llamado *electricidad positiva* a la que se desarrolla

sobre el vidrio, y *electricidad negativa* a la que se desarrolla sobre la resina.

Atracciones y repulsiones eléctricas.—Entre dos cuerpos cargados de electricidades diferentes (de nombres contrarios), se ejerce *atracción;* si los cuerpos están cargados de la misma electricidad (del mismo nombre), se ejerce *repulsión.*

Ley de Coulomb.—Las fuerzas de atracción o de repulsión que se ejercen entre dos cuerpos electrizados y suficientemente pequeños con relación a su distancia para que se les pueda considerar como puntos, son proporcionales a las cantidades de electricidad que poseen e inversamente proporcionales al cuadrado de su distancia.

Por consiguiente, si dos cuerpos (dos puntos) poseen respectivamente las cargas m y m' de electricidad y están separados por una distancia d, la atracción o repulsión (según que las cargas sean de diferente o de igual nombre) que entre ellos se ejerce tiene por expresión

$$K\frac{m\,m'}{d^2},$$

en que K es un factor que depende del medio que los separa.

Cuerpos conductores. Cuerpos aisladores. — Hay cuerpos en los cuales la electricidad permanece en los puntos en que ha sido desarrollada, sin extenderse a los demás; se dice que son malos conductores, y se les llama *aislantes* o *dieléctricos.*

En otros cuerpos, la electricidad desarrollada en un punto se esparce inmediatamente por toda la super-

ficie; se les llama por esto buenos conductores, o simplemente *conductores.*

El aire seco, el vidrio, la resina, la parafina son aislantes o dieléctricos; los metales, el cuerpo humano, la tierra son conductores.

Conductor aislado.—Si se electriza un conductor que no esté unido a otros conductores, y en particular a la tierra, sino por medio de sustancias aislantes, la electricidad se reparte sobre toda su superficie, pero no pasa a los otros conductores. Se dice entonces que el primer conductor está *aislado.* Así, una bola de latón sostenida por un pie de vidrio se dice que está aislada por el vidrio.

Si esta bola de latón se pone en comunicación con el suelo por medio de un conductor (un alambre o una cadena metálica), su electricidad se escapa hacia la tierra; la bola queda *descargada.*

Desarrollo simultáneo de las dos electricidades cuando se frotan dos cuerpos entre sí.—Al frotar dos cuerpos uno contra otro, sobre uno de ellos se desarrolla electricidad positiva, y sobre el otro una cantidad igual de electricidad negativa. Si uno de ellos es un dieléctrico, por ejemplo vidrio, y el otro un conductor, como una piel, la electricidad positiva que se desarrolla sobre el vidrio permanece en él, mientras que la negativa se escapa hacia el suelo a través del cuerpo de la persona que hace el experimento.

Densidad eléctrica en un punto.—Se llama densidad eléctrica en un punto de un cuerpo electrizado (aislante o conductor) a la cantidad de electricidad por centímetro cuadrado que se encuentra en la superficie del cuerpo en dicho punto.

Distribución de la electricidad sobre los conductores aislados.—En un conductor aislado ocurre lo siguiente:

1.° La carga eléctrica se halla por completo en su superficie externa.

2.° No está uniformemente repartida sobre dicha superficie, y por consiguiente la densidad eléctrica no es igual en todos los puntos (excepto en un conductor esférico). La densidad es mayor en las partes alargadas, de suerte que si se representa la carga por una capa más o menos gruesa, según que la densidad eléctrica sea mayor o menor, la distribución de la carga en un conductor cuya forma sea, por ejemplo, la indi-

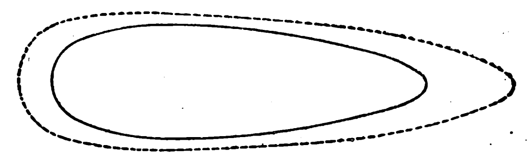


Fig. 1.

cada en trazo continuo en la figura 1, vendrá representada por el espesor de la capa comprendida entre el conductor y la línea de trazos discontinuos.

Cuando el conductor tiene alguna punta, la electricidad allí acumulada, bajo la repulsión de la electricidad del mismo nombre, se escapa por aquélla.

Campo eléctrico. Líneas de fuerza.—Si una masa de electricidad *positiva* se halla próxima a un conductor electrizado positivamente, dicha masa está sometida a una fuerza que tiende a alejarla del conductor, y esta fuerza se manifiesta en todos los puntos del espacio que lo rodea. Se expresa este hecho diciendo que un conductor electrizado crea a su alrededor un *campo eléctrico*.

Si se deja que la masa eléctrica positiva obedezca a la fuerza que actúa sobre ella, recorrerá una trayectoria, generalmente curva, que se llama *línea de fuerza.*

La *dirección del campo* en cada punto es la de la tangente a la línea de fuerza que pasa por dicho punto.

La *intensidad del campo* en cada punto es la de la fuerza que se ejerce sobre una masa eléctrica igual a la *unidad* y situada en el punto.

Una masa eléctrica positiva situada en un punto de un campo (positivo), se alejará a lo largo de la línea de fuerza que pase por el punto; en cambio, una masa negativa se moverá sobre la misma línea de fuerza, pero en sentido contrario.

Cuando un conductor está cargado de electricidad negativa las líneas de fuerza del campo creado por él están dirigidas hacia el conductor.

Si se tienen, próximos uno a otro, dos conductores cargados de electricidades de nombre contrario, las

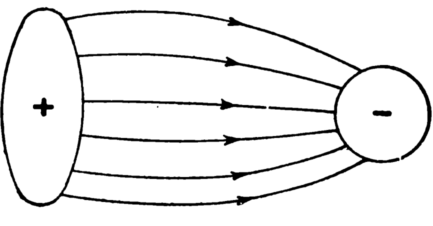


Fig. 2.

líneas de fuerza del campo resultante parten del conductor cargado positivamente y van a terminar en el que está cargado negativamente (fig. 2).

Superficies de nivel.—El campo eléctrico puede representarse también por *superficies de nivel,* que rodean al conductor y son cortadas *normalmente* por

las líneas de fuerza. La superficie del conductor es una de esas superficies de nivel, en la cual el campo tiene la intensidad máxima. Para un conductor esférico (o para un punto electrizado), las superficies de nivel son esferas concéntricas.

Potencial de un cuerpo electrizado.—La electricidad de que está cargado un cuerpo se puede considerar formada por partículas flúidas repartidas sobre toda su superficie y que actúan mutuamente con fuerzas de repulsión. Si estas partículas permanecen sobre el cuerpo, es porque no pueden pasar al aire, que es el dieléctrico que lo rodea. Por consiguiente, este dieléctrico ejerce un esfuerzo opuesto al que se desarrolla por la repulsión de las partículas de electricidad, cuyo conjunto puede compararse en cierto modo a una película *tensa* como la pared de un globo de caucho distendido por la presión del gas interior. Esta tensión eléctrica se llama *potencial* del conductor.

Mediante esta comparación, que sin ser exacta ni mucho menos puede ayudar a recordar los hechos, se concibe que ha de ocurrir lo siguiente:

1.° Si la cantidad de electricidad de que está cargado un conductor aumenta o disminuye, también aumenta o disminuye el potencial del conductor.

2.° En dos conductores de igual forma pero de dimensiones diferentes, una misma cantidad de electricidad determinará mayor potencial en el de menor superficie.

3.° En un conductor de superficie infinita, el potencial de una carga cualquiera es siempre nulo; tal es el caso de la Tierra, cuyo potencial es siempre prácticamente cero.

4.° Si se ponen en comunicación varios conductores aislados, la electricidad se dirige siempre hacia

los de menor potencial, no quedando en equilibrio eléctrico hasta que se ha igualado el potencial en todos ellos.

Medida del potencial. — Pueden compararse los potenciales de los cuerpos electrizados por medio de un *electroscopio,* aparato que, de un modo esencial, se halla formado por dos tenues láminas metálicas (generalmente panes de oro) fijadas a una varilla metálica que termina en una esferita también metálica; estas láminas van encerradas en una campana de vidrio, en la cual se procura mantener el aire seco para que constituya un dieléctrico perfecto (fig. 3).

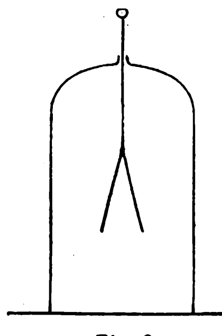


Fig. 3.

Si por la indicada esfera se ponen las dos laminillas en comunicación con un conductor electrizado, toma cada una de ellas determinada cantidad de una misma electricidad y se separan una de otra formando un ángulo cuya magnitud depende de la carga (ley de Coulomb).

La experiencia demuestra que cualquiera que sea el punto conectado con el electroscopio y, por tanto, cualquiera que sea la densidad eléctrica, la separación de las láminas es la misma. Por consiguiente, la cantidad de electricidad tomada por el electroscopio es la misma en todos los puntos del conductor, y la separación de las láminas permite medir una magnitud que caracteriza el estado eléctrico general del cuerpo. Puesto que la cantidad de electricidad es la misma en cada lámina, cualquiera que sea el punto del conductor, quiere decir que dichas láminas tienen siempre idéntico potencial, y como han sido puestas al mismo

potencial que el punto con que han estado conectadas, se deduce que la separación de las láminas del electroscopio permite medir el potencial de un cuerpo electrizado con el cual se conecta.

La carga de un conductor es proporcional al potencial de este conductor.—Si se carga sucesivamente un conductor de cantidades de electricidad dos, tres veces mayores, se comprueba que el potencial resulta también dos, tres veces más grande, lo que prueba que la carga Q es proporcional al potencial V del conductor, y, por lo tanto, puede escribirse

$$Q = C \times V;$$

fórmula en la cual C es un factor constante que sólo depende del conductor y que viene determinado por su forma y sus dimensiones. Este factor recibe el nombre de *capacidad* del conductor.

Analogías.—Para facilitar la comprensión de determinados fenómenos, puede ser muy útil considerar la electricidad como un verdadero flúido y compararlo con otros flúidos, singularmente con el agua y el calor.

Comparación con el agua.—Puede compararse un conductor eléctrico con un recipiente cilíndrico de altura indeterminada y cuya superficie de base S es susceptible de ser asimilada a la capacidad C del conductor. Si se vierte en este vaso una determinada cantidad de agua Q (en la cual veremos representada la carga eléctrica del conductor), el nivel del agua se elevará a una altura H, que, por comparación, podremos tomarla por el potencial V. La cantidad de agua contenida en el recipiente será:

$$Q = S \times H,$$

así como la carga del conductor es

$$Q = C \times V.$$

Cuando el vaso, cuyo líquido se halla a la altura H del fondo, se pone en comunicación con otro colocado en el mismo plano, pero en el cual el nivel del agua llegue a una elevación H' inferior a H, el agua del primer recipiente va pasando al segundo hasta que ambos niveles se igualan.

Comparación con el calor.—También los conductores electrizados pueden compararse a los cuerpos calientes: las cargas eléctricas son entonces asimilables a las cantidades de calor de los cuerpos, y sus temperaturas a las potenciales. Si un cuerpo a la temperatura T se pone en comunicación por medio de un conductor calorífico con otro cuerpo que se halle a la temperatura inferior T', irá pasando del primer cuerpo al segundo una determinada cantidad de calor hasta que ambos tengan igual temperatura.

Energía potencial de un conductor electrizado.—Si un conductor aislado y cargado con una determinada cantidad Q de electricidad y al potencial V se pone en comunicación con la tierra al potencial cero, toda la carga de aquél pasará a ésta.

La circulación de la electricidad representa una energía, que se manifiesta, según la naturaleza del conductor a cuyo través pase, en forma de calor, de trabajo mecánico o de trabajo químico. Esta energía cinética es debida por completo al estado eléctrico del conductor electrizado que se caracteriza por su carga y su potencial; este conductor poseía, pues, antes de su descarga, una energía igual en estado potencial. Esto se expresa diciendo que el conductor posee una determinada *energía potencial*.

Así como una cantidad Q de agua al precipitarse de una altura H produce un trabajo que se mide por el producto $Q \times H$, de igual modo si una cantidad de electricidad Q mantenida al potencial V atraviesa un conductor, surge una energía cinética que puede ser determinada por el producto

$$K \times Q \times V,$$

en el cual K representa un factor constante que depende de las unidades elegidas para expresar el valor de estas magnitudes. Más adelante veremos que esta elección se ha hecho de tal modo que $K = 1$.

Pero cuando un conductor se descarga, su potencial va disminuyendo al mismo tiempo que la electricidad

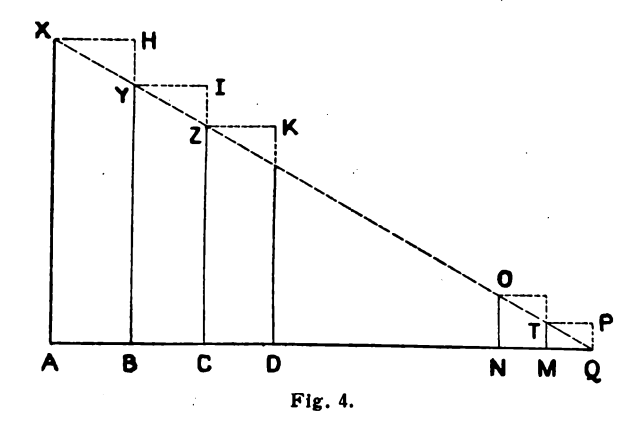


Fig. 4.

desaparece. Para evaluar la energía que posee un conductor electrizado, dividamos el tiempo durante el cual se descarga en intervalos tan pequeños, que durante cada uno de ellos el potencial pueda considerarse como constante. Al principio, el potencial es V_1, y durante el primer intervalo ha descargado una cantidad Q_1 de electricidad de tal modo, que la energía potencial per-

dida por el conductor y transformada en energía cinética resulta $V_1 \times Q_1$; después, el potencial desciende a V_2 y en este segundo intervalo se desprende una cantidad Q_2, de modo que la energía potencial transformada en cinética es igual a $V_2 \times Q_2$, y así sucesivamente.

Representemos (fig. 4) las cargas sucesivamente perdidas por el conductor, durante cada uno de estos intervalos, por los segmentos sucesivos AB, BC,... MQ, y en los puntos A, B, C,... tracemos perpendiculares a la recta AQ, sobre las cuales tomaremos longitudes que midan los potenciales del conductor durante cada intervalo: AX será la medida de V_1, y BY la de V_2...

Los valores de la energía perdida por el conductor estarán representados por las áreas de los rectángulos $AXHB$, $BYIC$... $NOTM$, $MTPQ$, y la energía que poseía el conductor vendrá medida por la suma de todas estas áreas.

Por la proporcionalidad entre las cargas y los potenciales, se tiene:

$$\frac{AX}{AB}=\frac{BY}{BC}=\ldots\frac{MT}{MQ}$$

y, por consecuencia, los puntos X, Y, Z... O, T, Q se hallan sobre una misma recta. Siendo, además, infinitamente pequeños los segmentos AB, BC, que miden las cargas perdidas durante tiempos elementales, la suma de las áreas de los rectángulos considerados será igual a la superficie del triángulo AXQ.

La energía potencial poseída por el conductor, antes de la descarga, se mide por

$$\frac{AQ \times AX}{2},$$

esto es, por el producto

$$\frac{V_1 \times Q}{2}.$$

Así, *la energía potencial de un conductor electrizado tiene por valor el semiproducto de su potencial por su carga.*

Ya se ha visto que el valor de la carga de un conductor es igual a

$$Q = C \times V,$$

en que C es la capacidad del conductor, de modo que la energía potencial será:

$$W = \frac{1}{2} V \times C V = \frac{1}{2} C V^2.$$

La energía potencial de un conductor electrizado tiene por valor el semiproducto de su capacidad por el cuadrado de su potencial.

Energía desarrollada en el conductor que enlaza eléctricamente dos conductores aislados cargados con una misma electricidad.—Sean C la capacidad, Q la carga y V el potencial del primer conductor, y C', Q' y V', respectivamente, la capacidad, carga y potencial del segundo. Si V es superior a V', pasará una determinada cantidad de electricidad del primer conductor al segundo, hasta que ambos tengan el mismo potencial v.

En este momento los dos conductores se comportarán como uno solo de capacidad $C + C'$ con una carga igual a $Q + Q'$, de modo que el potencial común será:

(1) $$v = \frac{Q + Q'}{C + C'} = \frac{C V + C' V'}{C + C'}.$$

La energía potencial poseída por el primer conductor antes del enlace era $\frac{1}{2}CV^2$, que después de la comunicación se ha convertido en $\frac{1}{2}Cv^2$, perdiendo el conductor, por consecuencia, una energía igual a

$$\frac{1}{2}CV^2 - \frac{1}{2}Cv^2 = \frac{1}{2}C(V^2 - v^2).$$

La energía potencial del segundo conductor, que antes del enlace era $\frac{1}{2}C'V'^2$, fué aumentando con la carga hasta convertirse en $\frac{1}{2}C'v^2$, tomando por tanto este conductor una energía que puede medirse por

$$\frac{1}{2}C'v^2 - \frac{1}{2}C'V'^2 = \frac{1}{2}C'(v^2 - V'^2).$$

La diferencia entre la energía perdida por el primero y la adquirida por el segundo, es la energía que ha sido transformada en el conductor de enlace, cuyo valor tiene por expresión:

$$W = \frac{1}{2}C(V^2 - v^2) - \frac{1}{2}C'(v^2 - V'^2),$$

o bien

$$W = \frac{1}{2}CV^2 + \frac{1}{2}C'V'^2 - \frac{1}{2}v^2(C + C')$$

y sustituyendo v por su valor (1), se tiene:

$$W = \frac{1}{2}CV^2 + \frac{1}{2}C'V'^2 - \frac{1}{2}\frac{(CV + C'V')^2}{C + C'}$$

sea

$$W = \frac{\frac{1}{2} C^2 V^2 + \frac{1}{2} CC' V^2 + \frac{1}{2} C'^2 V'^2 + \frac{1}{2} CC' V^2}{C + C'} +$$

$$+ \frac{-\frac{1}{2} C^2 V^2 - \frac{1}{2} C'^2 V'^2 - CC' V V'}{C + C'}$$

$$(2) \quad W = \frac{1}{2} \frac{CC' (V^2 + V'^2 - 2 V V')}{C + C'} = \frac{1}{2} \frac{CC' (V - V')^2}{C + C'}.$$

Además, la carga del primer conductor era, antes de su enlace,

$$Q = C V$$

que se transformó en

$$Q_1 = C v;$$

por consecuencia, la cantidad de electricidad que pasó por el conductor es

$$q = Q - Q_1 = C (V - v)$$

y sustituyendo v por su valor (1)

$$q = C \left(V - \frac{C V + C' V'}{C + C'} \right) = C \frac{C V + C' V - C V - C' V'}{C + C'}$$

$$= \frac{CC' (V - V')}{C + C'};$$

por fin llevando este valor a (2)

$$(3) \qquad W = \frac{1}{2} q (V - V').$$

Por consecuencia, *cuando dos conductores cargados de cantidades de electricidad del mismo nombre se hallan enlazados por un conductor, la energía que*

en éste aparece tiene por valor el semiproducto de la cantidad de electricidad que lo atraviesa por la diferencia de los potenciales de los otros dos conductores.

Conductores cargados de electricidad de nombre contrario. — Supongamos dos conductores cargados, uno de electricidad positiva, y otro de electricidad negativa. Si se les coloca el uno ante el otro, se ejerce sobre las partículas de electricidad repartidas por sus superficies:

1.°, una fuerza de repulsión por parte de la electricidad del cuerpo en que se hallen;

2.°, una fuerza de atracción producida por la electricidad de nombre contrario del otro cuerpo.

El dieléctrico que los separa se halla sometido, por estas fuerzas del mismo sentido que juntan sus efectos, a una tensión que aumenta a medida que los dos cuerpos se aproximan, hasta que llegan a tomar una posición relativa tal que el dieléctrico se rompe, las electricidades se recombinan y se neutralizan, surgiendo la chispa. Si los conductores contenían la misma carga quedan por completo descargados; si uno de ellos contiene una carga superior a la del otro, subsiste una carga igual a su diferencia y de la misma naturaleza que la mayor de ellas. Sea q la cantidad de electricidad del conductor menos cargado, y V y V_1 los primitivos potenciales de ambos conductores: uno de ellos ha perdido una energía potencial igual a $^1/_2 \times V \times q$, y la pérdida por el otro es igual a $^1/_2 \times V_1 \times q$; de modo que la energía aparecida en la chispa en forma de calor, luz, etc., es:

$$\frac{1}{2} V \times q + \frac{1}{2} V_1 \times q$$

$$\text{o bien } \frac{1}{2} q (V + V_1).$$

Se ha convenido considerar como positivo el número que mide el potencial de un cuerpo electrizado positivamente, y, por el contrario, se hace preceder del signo *menos* el número que mide el potencial de un cuerpo electrizado negativamente, de modo que se puede escribir

$$V_1 = - V'.$$

Por consecuencia, la energía transformada tiene un valor que se expresa por

$$\frac{1}{2} q (V - V').$$

Pero esto no constituye más que un medio convencional que facilita el lenguaje y generaliza la fórmula ya establecida (3).

Si los dos conductores electrizados se hallan unidos por otro, precisamente a través de éste se realiza el desprendimiento de partículas eléctricas, y la energía desarrollada en él es igual a

$$\frac{1}{2} q (V - V').$$

Todo esto sucede como si una carga q de una misma electricidad pasase de un conductor con potencial $+ V$ a otro con potencial $- V'$. Y aun cuando esta interpretación no es rigurosa resulta muy cómoda, porque permite expresar de un modo sencillo y exacto los valores de las magnitudes que intervienen en el fenómeno, admitiendo que la electricidad pasa como un líquido, de un nivel superior (potencial de un conductor cargado positivamente) a otro nivel inferior (potencial de un conductor cargado negativamente).

Acción de los cuerpos electrizados sobre los cuerpos inmediatos, o inducción electrostática. — Cuando

un conductor se halla en el campo creado por un cuerpo electrizado, sufre a distancia los efectos siguientes, según los casos.

1.° *Si el conductor sometido a la acción del campo (inducido) se halla aislado.*

En la región que se encuentra frente al conductor que crea el campo (inductor), se carga de una determi-

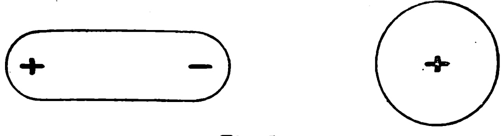


Fig. 5.

nada cantidad de electricidad de nombre contrario a la del inductor y, en la región opuesta, de la misma cantidad de electricidad pero de idéntico nombre que la del inductor (fig. 5).

Si el inducido rodea completamente al inductor, cada una de las cantidades de electricidad que sobre él

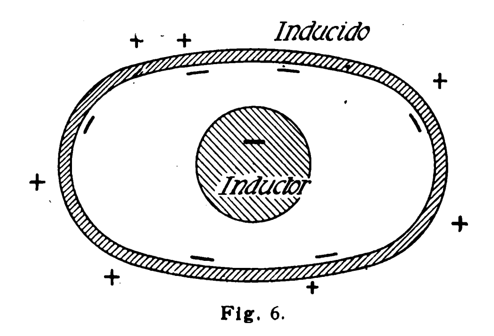


Fig. 6.

aparecen son iguales a aquella de que se halla cargado el inductor (fig. 6).

Cuando, por el contrario, es el cuerpo electrizado el que rodea por completo al conductor, ningún efecto se ejerce sobre éste y no hay inducción (fig. 7).

2.° *Si el conductor sometido a la influencia del cuerpo electrizado se halla en comunicación con la tierra.*

En el conductor sólo aparece una electricidad, de nombre contrario a la del inductor, y se reparte por la superficie más inmediata a él, atraída por la carga inductora.

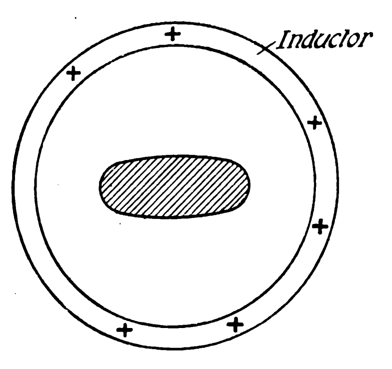


Fig. 7.

La electricidad del mismo nombre que se ha desarrollado ha sido rechazada hacia la tierra (figura 8).

3.° *Si el cuerpo electrizado rodea por completo el conductor,* no sólo no ejerce ninguna acción sobre él, sino que le defiende de la acción eléctrica de los cuerpos vecinos más ale-

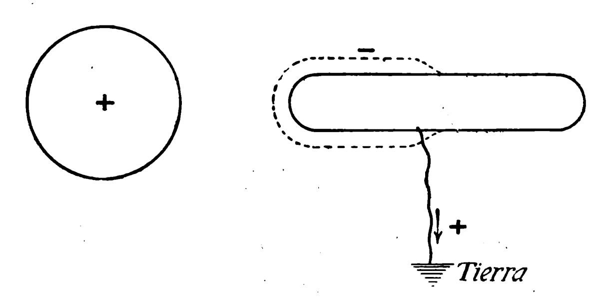


Fig. 8.

jados. El cuerpo que rodea al conductor constituye para éste una *pantalla eléctrica.*

Observación. — Los fenómenos descritos pueden explicarse diciendo que los cuerpos no cargados se hallan en estado neutro y que, en tal estado, poseen

cargas iguales de electricidad de nombres contrarios; estas cargas producen sobre las masas eléctricas inmediatas fuerzas iguales y de sentido contrario, cuya resultante es nula.

El frotamiento separa estas cargas: entonces la electricidad positiva pasa a uno de los cuerpos y la negativa al otro.

Cuando un conductor en estado neutro es sometido a la influencia de un cuerpo electrizado positivamente, por ejemplo, se separan las dos electricidades que estaban repartidas de un modo uniforme sobre el conductor: la negativa, atraída por la positiva del inductor, es conducida lo más cerca posible de él, mientras que la positiva, por el contrario, es rechazada lo más lejos posible y, si el conductor no está aislado, se escapa hacia tierra. Si después se aísla el conductor y se aleja el cuerpo electrizado, la electricidad negativa se extiende por el conductor, el cual *queda cargado negativamente*.

Si, por el contrario, el conductor inducido está aislado desde un principio, cuando se aleja el inductor las dos electricidades se extienden sobre la totalidad de la superficie y el conductor vuelve al estado neutro.

Generadores de electricidad.—Los generadores de electricidad pueden ser:

1.° *Un cuerpo frotado de un modo continuo.*—El generador consiste entonces en un disco de vidrio o de ebonita movido por una manivela, en cuyo centro se halle fijo. Este disco pasa entre dos almohadillas fijas, contra las cuales frota durante la rotación. La electricidad así desarrollada actúa por inducción sobre unos conductores metálicos aislados y provistos de puntas, por los cuales se escapa la electricidad del mismo nombre que la desarrollada por el disco. De este modo los

conductores se mantienen a un potencial constante que depende de la velocidad de rotación y pueden suministrar de un modo continuo cargas eléctricas. Tales son las máquinas electrostáticas de Ramsden y de Wimshurst.

Fig. 9.

La energía en forma eléctrica así utilizable es debida a la transformación del trabajo mecánico necesario para sostener la rotación del disco.

2.° *Dos metales mantenidos en contacto y constantemente calentados en el punto de contacto.*

Si, por ejemplo, se establece contacto entre una lámina de cobre y otra de zinc (fig. 9), se comprueba que aquélla se carga de electricidad negativa y ésta de electricidad positiva. El potencial de ambos metales se mantendrá, si se hacen circular estas cargas por cuerpos conductores, calentando los metales en su punto de contacto. Este conjunto constituye una pila térmica.

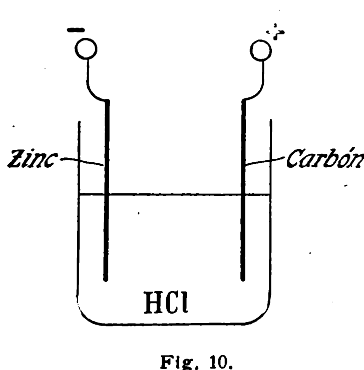


Fig. 10.

La energía eléctrica desarrollada proviene de la transformación de la energía calorífica empleada en calentar el punto de contacto.

3.° *Dos cuerpos sumergidos en un líquido que produce sobre ambos o sobre uno de ellos una acción química,* por ejemplo, una lámina de zinc y otra de carbón de retorta sumergidas en agua acidulada con ácido clorhídrico, que ataca al zinc para producir clo-

ruro de zinc (fig. 10). En este caso se desarrolla una acción análoga a la combustión: el zinc, combustible, es transformado por el ácido clorhídrico, comburente, del mismo modo que el carbón combustible es transformado en gas carbónico por el oxígeno, que es el comburente del aire. Se comprueba que el carbón se carga de electricidad positiva con un cierto potencial V, y que el zinc se carga de electricidad negativa con el mismo potencial V; estos potenciales se mantienen constantes, aun cuando se dejen circular las cargas eléctricas sobre otros conductores, todo el tiempo que dure la acción química.

Con esto se tiene lo que se llama una *pila*.

Condensación. — Condensador

Supongamos (fig. 11, *a*) un conductor aislado, de capacidad C, y pongámoslo en comunicación con un generador de electricidad positiva, por ejemplo, manteniendo su potencial en el valor V. El conductor se pone al mismo potencial que el generador y toma una carga $Q = CV$. Su potencial puede apreciarse por el apartamiento de las hojas de un electroscopio puesto en comunicación con él (fig. 11, *b*). Si se separa del generador el conductor así cargado y se le aproxima otro conductor que se halle en comunicación con el suelo, se comprueba que el apartamiento de las hojas del electroscopio va disminuyendo a medida que este conductor se acerca al primero (fig. 11, *c*). Ahora bien, el primer conductor, por hallarse aislado, ha conservado toda su carga, y puesto que su potencial ha tomado un valor V' inferior a V, ha aumentado su capacidad tomando un valor C' superior a C, de modo que

$$Q = C \times V = C' \times V'.$$

Por consecuencia, *se aumenta la capacidad de un conductor poniéndolo frente a otro que se halle en comunicación con la tierra, aumento que será tanto*

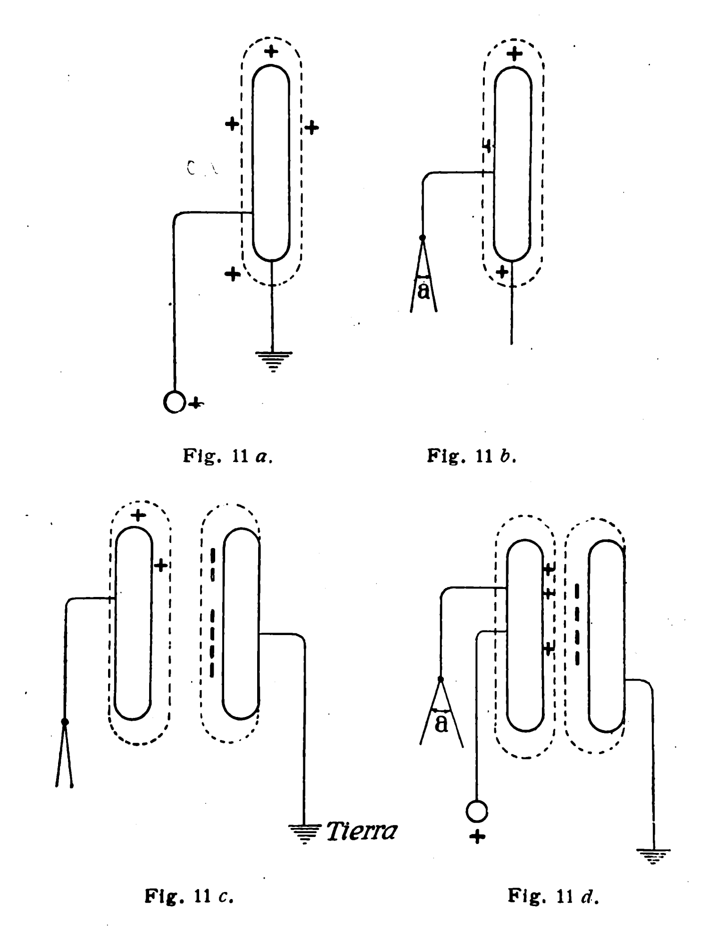


Fig. 11 *a*. Fig. 11 *b*.

Fig. 11 *c*. Fig. 11 *d*.

mayor cuanto más se acerque este conductor al primero.

Este fenómeno recibe el nombre de *condensación,* y se llama *condensador* el aparato formado por los dos

conductores (separados por un dieléctrico, aire por ejemplo).

Supongamos que el primer conductor se halle cargado de electricidad positiva; en este caso su influencia sobre el segundo se ejercerá por inducción, descompondrá su electricidad neutra en negativa que atraerá hacia sí, y positiva que será rechazada hacia la tierra. La distribución de las electricidades sobre las superficies de ambos conductores queda representada, con arreglo a lo que ya dijimos, en la figura 11, *c*; la carga de electricidad negativa del conductor inducido es igual a la carga positiva del inductor.

La capacidad que adquiere el conductor conectado al manantial de electricidad, en presencia del conductor unido a la tierra, es lo que se denomina *capacidad del condensador*. Su valor depende únicamente de la forma, dimensiones y distancia de ambos conductores.

Los dos conductores reciben el nombre de *armaduras* del condensador.

Supongamos ahora un condensador de capacidad C y enlacemos una de las armaduras A (fig. 15) a un manantial de electricidad positiva P cuyo potencial tenga el valor V, y la otra armadura B a un manantial de electricidad negativa N cuyo potencial sea V_1. La carga de A ejercerá su influencia sobre B, descompondrá su electricidad neutra en negativa, mantenida sobre B, y en positiva, rechazada, que quedará neutralizada por la electricidad negativa del manantial; de modo que todo ocurrirá como si la armadura B se hallase unida a la tierra, y el efecto del manantial positivo será el de cargar ambas armaduras con la cantidad CV, positiva sobre A y negativa sobre B. De igual modo el efecto del manantial de electricidad negativa es el de cargar la armadura A con la cantidad CV_1 de electricidad positiva y la armadura B con

igual cantidad de electricidad negativa, de modo que cada una de las dos armaduras resultará cargada con la cantidad

$$CV + CV_1$$

o

$$C(V + V_1),$$

positiva sobre A y negativa sobre B. Esta cantidad será, pues, la carga del condensador. Según lo ya indicado, el potencial del manantial negativo va precedido del signo *menos* y se puede escribir

$$-V_1 = V';$$

la carga del condensador será entonces

$$Q = C(V - V').$$

Si se toman como manantiales los dos polos de una pila, conectando las dos armaduras de un condensador a los polos de la misma, entre los cuales haya una diferencia de potencial $V - V'$, la carga tendrá por valor

$$Q = C(V - V').$$

Carga y descarga de un condensador. Corriente. — Cuando dos armaduras se hallan unidas a los polos de una pila, como se ha indicado, una determinada cantidad de electricidad positiva sale del polo positivo y se extiende por una armadura, mientras la misma cantidad de electricidad negativa parte del polo negativo para ocupar la otra armadura. Cuando los potenciales de ambas armaduras han alcanzado ya el mismo valor que los del manantial, queda suspendido el transporte de electricidad, se ha establecido el equilibrio, y se dice que el condensador se halla *cargado*.

Si después de haber separado el manantial se apro-

xima (sin que lleguen a tocarse) los conductores enlazados a las armaduras, llega un momento en que surge una chispa; ambas electricidades se recombinan a través del aire, el condensador se descarga y esto constituye lo que se llama la descarga *disruptiva.*

Si se unen las armaduras con un conductor único, a través de éste se recombinan las electricidades y se realiza la descarga *conductiva.*

Tanto durante la carga como durante la descarga, los conductores han sido recorridos por una *corriente* eléctrica.

Sentido de la corriente.—Supongamos un conductor — por ejemplo, un hilo metálico (fig. 12) — que enlace un manantial de electricidad *positiva A* con un conductor *B* unido a la tierra: determinada cantidad de electricidad pasará de *A* a *B*; el hilo *AB* es recorrido por una corriente y se dice *de un modo convencional* que tal corriente tiene el sentido *AB.*

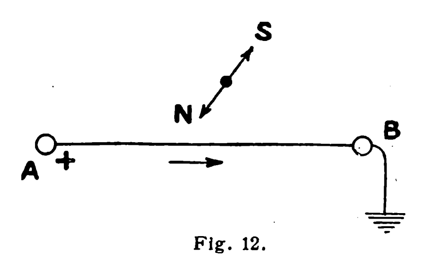


Fig. 12.

Así, convenimos en que el sentido de una corriente en un conductor es la de una carga *positiva* transportada en el conductor.

Para hallar el sentido de una corriente en un conductor puede recurrirse a una regla imaginada por Ampère.

Supongamos una aguja imanada puesta encima del conductor *AB* (fig. 12), a través del cual una carga positiva pasa de *A* a *B*, y un observador (el *observador* de Ampère) con los pies en *A*, la cabeza en *B* y mirando hacia la aguja, esto es, echado a lo largo del conductor

de modo que la corriente le entre por los pies y le salga por la cabeza. Se comprueba que la aguja, influída por la corriente, se coloca perpendicularmente a la dirección *AB*, en tal forma que su polo norte se dirige hacia la *izquierda* del observador.

Si el manantial positivo se sitúa en *B*, y si *A* se pone en comunicación con la tierra, la aguja girará 180°, su polo norte ocupará la posición que antes ocupaba el polo sur y el observador tendido con los pies en *B* y la cabeza en *A* continuará viendo a su izquierda el polo norte de la aguja imanada (figura 13). Así, la aguja imanada permite hallar el sentido de una corriente.

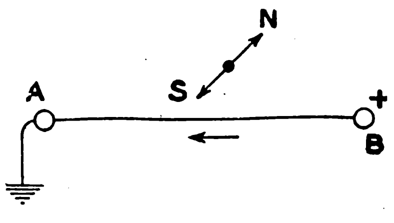


Fig. 13.

Supongamos ahora un manantial *A* de electricidad negativa (fig. 14) enlazado por un hilo conductor a un

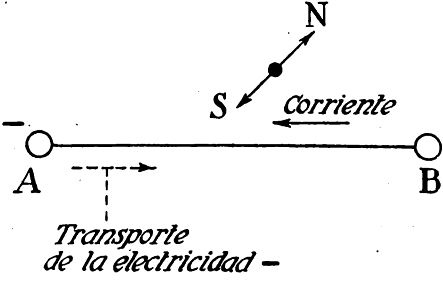


Fig. 14.

conductor *B* en comunicación con la tierra; una determinada cantidad de electricidad negativa es transportada de *A* a *B* y el hilo es también recorrido por una corriente. Aplicando la regla de Ampère se comprueba

que la corriente se dirige de A a B, esto es, en sentido inverso al del paso de la electricidad.

Así, *cuando la electricidad negativa es transportada a través de un conductor, éste se halla recorrido por una corriente que es de sentido inverso al del transporte de la electricidad.*

Supongamos un condensador AB (fig. 15) cargado por un generador P, N (P, polo positivo; N, polo nega-

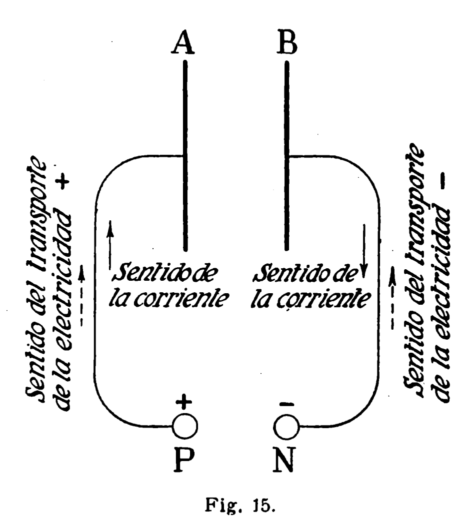


Fig. 15.

tivo). Una carga positiva parte de P hacia A, y PA es recorrido por una corriente de sentido PA, y una carga negativa sale de N hacia B y el conductor NB es recorrido por una corriente de B hacia N.

Todo ello ocurre como si durante la carga se hubiese producido una corriente que fuese de P a N a través del condensador; esto es lo que se denomina *corriente de carga*. Igualmente si se descarga el condensador a través de un conductor CD (fig. 16) la carga positiva de A fluye en la dirección AC, y AC es

recorrido por una corriente cuyo sentido va de *A* a *C*; la carga negativa pasa de *B* hacia *D* y el conductor *BD* es recorrido por una corriente en sentido *DB*. Todo ello se realiza como si se hubiese establecido una corriente de *A* a *B* a través de *CD*, que es lo que se denomina *corriente de descarga*.

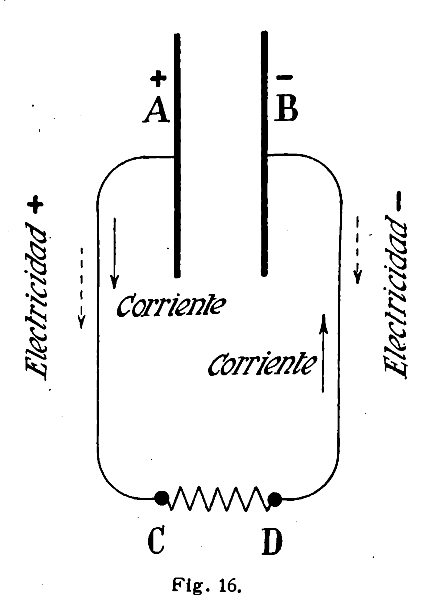


Fig. 16.

En el condensador examinado, las dos armaduras se hallan separadas por un determinado espesor de aire, dieléctrico, que retiene las cargas positiva y negativa, en los conductores.

Cuando se desean condensadores de mayor capacidad, es necesario aproximar cuanto sea posible las armaduras interponiendo entre ellas, para evitar la ruptura del medio aislante, otro dieléctrico (vidrio, parafina, etc.) que tenga mayor *rigidez*.

Objeto del dieléctrico.—Sea *C* la capacidad de un condensador que tenga por dieléctrico el aire; supongamos otro condensador igual pero en el que el aire haya sido sustituído por un dieléctrico de vidrio, por ejemplo, del mismo espesor que la capa de aire: se comprueba que este condensador tiene una capacidad *C'* superior a la del primero. Este aumento de capacidad se debe, evidentemente, al dieléctrico, y, por consecuen-

cia, la relación $\frac{C'}{C}$ constituye una característica de la naturaleza de este dieléctrico que recibe el nombre de *poder inductor específico*. El poder inductor específico del vidrio es, aproximadamente, 6; el de la parafina 2,3; etc.

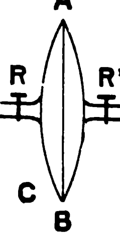


Fig. 17.

La experiencia demuestra, además, que la carga no se reparte sólo por las armaduras del condensador, sino que en parte pasa al dieléctrico. Se puede, por tanto, admitir que se produce en el dieléctrico una *distribución de electricidad,* consecuencia de una tensión debida a las acciones recíprocas de las moléculas electrizadas del dieléctrico, tensión comparable a la de un cuerpo elástico. Esta concepción nos permite establecer una comparación que, aun cuando no dé una idea rigurosamente exacta, facilita que podamos representarnos de un modo claro los movimientos de la electricidad en la carga y descarga de un condensador.

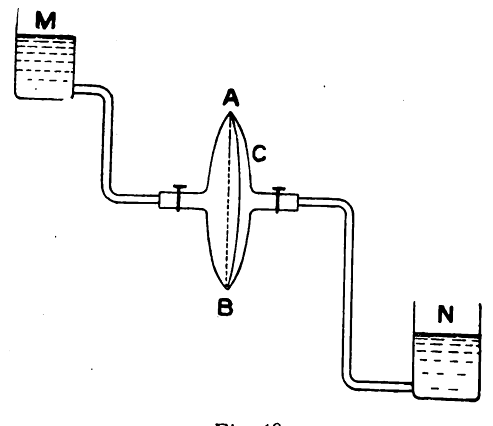


Fig. 18.

Supongamos una cápsula *C* (fig. 17) dividida en dos partes por una pared elástica *AB* y llena de agua, y cada uno de estos compartimientos con un tubo provisto de grifo *R* y *R'*. Estos grifos están cerrados, y por ser igual la presión del agua por uno y otro lado, la pared *AB* se halla sometida en ambos a dos fuerzas idénticas y opuestas cuya resultante es nula.

Enlacemos ahora los dos tubos a dos depósitos de agua (fig. 18), uno de ellos al nivel superior *M* y el otro al nivel inferior *N*, que representan los manantiales positivo y negativo de electricidad que carga el condensador. La pared, por la diferencia entre las presiones producidas por *M* y *N*, se pondrá tensa, y una corriente de agua se establecerá de *M* a *C* y de *C* a *N* como si los depósitos estuvieran en comunicación directa. Y cuando la tensión elástica de *AB* equilibre la diferencia de presiones, el equilibrio quedará establecido. Cerremos entonces los grifos, y quedará cargado el aparato de igual modo que habíamos cargado, con la pila, el condensador. Si ahora se empalman los dos tubos con otro *T* (fig. 19) y se abren los grifos, la pared se distenderá y una corriente de agua circulará por *T*, como la producida al descargar el condensador.

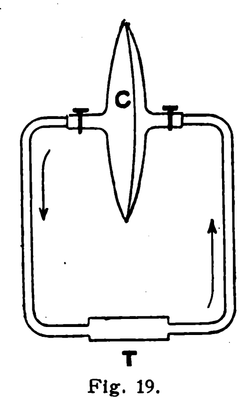


Fig. 19.

Carga residual.— Cuando las armaduras de un condensador cargado han sido enlazadas a dos conductores bastante próximos entre sí para que surja una chispa que lo descargue, reaparece una nueva carga sobre las armaduras, debido a las electricidades que habían penetrado en el dieléctrico: es la carga residual, cuyo

valor depende del dieléctrico y del tiempo durante el cual el condensador ha estado sometido a la acción del manantial.

Formas de los condensadores.—*Condensador cilíndrico.* — El modelo de este género es la botella de Leiden, formada por un bocal de vidrio barnizado con goma laca, cuyas superficies externa e interna se hallan revestidas de láminas de estaño que constituyen las armaduras.

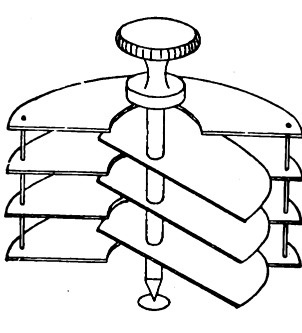


Fig. 20.

Condensador plano. — Hállase formado por dos discos metálicos paralelos, separados por un determinado espesor de aire o por otro dieléctrico. Si la superficie de la parte de cada disco que se halla frente al otro es S, si el espesor del aislante es e y el poder inductor específico del dieléctrico es K, se demuestra que la capacidad del condensador será:

$$C = \frac{KS}{4\pi e}.$$

Se consigue un condensador de mayor capacidad por medio de varios discos que se comuniquen entre sí, y entre los cuales haya otros separados de los primeros por un dieléctrico. La suma de las superficies de las partes de los discos correspondientes a uno de los grupos, que se hallan enfrente de los discos del otro grupo, constituye la superficie de cada una de las armaduras.

Condensador de capacidad variable.— Son fijos los discos metálicos semicirculares de uno de los grupos;

los del otro son solidarios de un eje de rotación que pasa por su centro y sobre el cual han sido montados (figura 20). Cuando este eje gira, los discos movibles

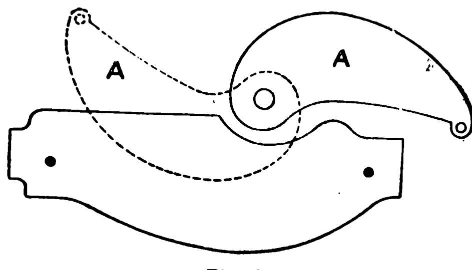


Fig. 21.

penetran más o menos en el espacio comprendido entre los discos fijos, y esto hace que la capacidad aumente o disminuya. Para conseguir una gran sensibilidad en las variaciones de capacidad, se da a las láminas movibles la forma *A* (fig. 21).

CAPÍTULO III

Constitución de la materia

Teoría de los electrones

Generalidades.—Los trabajos de numerosos sabios, orientados por el descubrimiento de los rayos X, de los cuerpos radioactivos, etc., nos han llevado a considerar el átomo, no como el elemento último, indivisible e inerte de la materia, sino como un edificio complejo formado por elementos infinitamente más pequeños y en continuo estado de movimiento.

El átomo se nos aparece como constituído por un agrupamiento cargado de electricidad positiva, el *núcleo,* a cuyo alrededor gravitan masas de electricidad negativa, los *electrones.* Viene a ser, en lo infinitamente pequeño, lo que nuestro mundo solar en lo infinitamente grande: el núcleo se comporta como el sol; los electrones, como los planetas.

El mismo núcleo se halla constituído por partículas electrizadas positivamente, cada una de las cuales tiene una carga igual a la negativa de un electrón, y de un determinado número de electrones; pero la suma de las cargas positivas es superior a la de las cargas negativas, es decir, que el número de partículas positivas es mayor que el de electrones, de modo que

el núcleo se comporta como una masa electrizada positivamente.

Por otra parte, la suma de las cargas negativas de los electrones—de los que forman parte del núcleo y de los que gravitan a su alrededor—es igual a la suma de las cargas del núcleo electrizadas positivamente, y, por tanto, el átomo permanece neutro.

En el átomo de hidrógeno el núcleo se halla constituído por una partícula cargada positivamente, el *protón*, y de un electrón-planeta que gravita alrededor de este núcleo.

Los núcleos de los átomos de los otros cuerpos están formados por un determinado número de protones y un número menor de electrones.

Así, el átomo de sodio aparece como constituído: por un núcleo formado por 23 protones (23, peso atómico del sodio) y 12 electrones, y por 11 electrones-planetas que giran alrededor del núcleo.

La velocidad de los electrones alrededor del núcleo es muy grande y aumenta, además, cuando se eleva la temperatura del cuerpo de que forma parte el átomo.

Disgregación del átomo.—La disgregación del átomo, su disociación en electrones negativos y partículas cargadas positivamente, puede producirse de varias maneras:

1.ª *Espontáneamente* o, por lo menos, sin ninguna intervención aparente. Esta disociación es particularmente activa en determinados cuerpos llamados *radioactivos,* en que los electrones proyectados fuera de los átomos forman lo que se denomina rayos α y las partículas cargadas positivamente los rayos β.

2.ª *Por acciones mecánicas o químicas.*—El frotamiento, por ejemplo, de una barra metálica, es susceptible de producir la disgregación de algunos átomos en

forma que los electrones o las cargas positivas liberadas, infinitamente pequeños en relación con los átomos, puedan moverse entre los espacios que quedan entre los átomos que constituyen el metal; y estas cargas eléctricas, por sus acciones recíprocas o por una acción eléctrica exterior, pueden tomar una dirección determinada y constituir una corriente. Esta disgregación atómica puede producirse también por un efecto químico, como ocurre en una pila por la acción del ácido sulfúrico o clorhídrico sobre el zinc.

3.ª *Por la acción del calor.* — Si, por ejemplo, se pone a elevada temperatura un filamento metálico encerrado en una bombilla en que se ha hecho suficiente vacío, los electrones de los átomos de metal toman tal velocidad, que se hayan sometidos a una fuerza centrífuga mayor que la fuerza de atracción ejercida por el núcleo, y los electrones son proyectados en todas direcciones en el interior de la bombilla.

4.ª *Por la acción de una tensión eléctrica suficientemente elevada.* — En una bombilla de vidrio

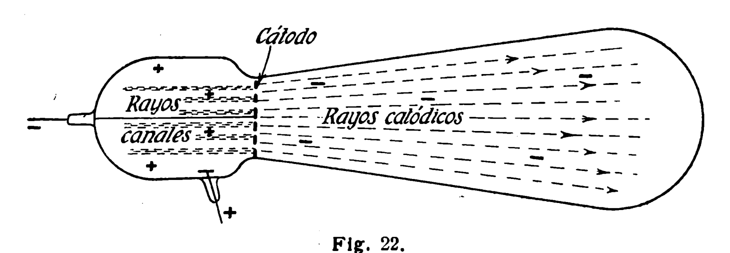


Fig. 22.

(figura 22) penetran dos conductores, a los cuales han sido fijadas, en el interior, plaquitas metálicas; y en la bombilla se ha hecho un vacío suficientemente intenso para que la presión en el interior venga a ser como de una milésima de milímetro de la columna de mercurio. Si se ponen los conductores en comunicación con los

dos polos de un generador entre los cuales se sostenga una tensión elevada, se comprueba, por numerosas manifestaciones, que de la placa enlazada al polo negativo *(catodo)* parten electrones proyectados con la velocidad de 200000 kilómetros por segundo, que siguen trayectorias perpendiculares a la superficie del catodo y cuyas direcciones son, por consecuencia, independientes de la posición del *anodo* (1) enlazado al polo positivo del generador. Además, si la placa que hace de catodo tiene una serie de agujeritos, se comprueba que las partículas cargadas de electricidad positiva son proyectadas en sentido inverso que los electrones.

Los electrones cargados de electricidad negativa proyectados así por el catodo, constituyen lo que se denomina *rayos catódicos.* Las cargas positivas proyectadas en sentido inverso, forman lo que ha sido llamado *rayos canales.* Los electrones y partículas cargadas de electricidad positiva proceden de la disgregación de los átomos por la tensión eléctrica.

El vacío considerable en la ampolla no sólo favorece la disgregación, sino que permite a la vez comprobar el movimiento de los electrones, que por no estar detenidos por los átomos, muy rarificados, del interior de la bombilla, son lanzados en línea recta. Los átomos del gas rarificado de la bombilla y que se encuentran en la proximidad del catodo sufren el choque de los electrones producidos en éste, son a su vez disociados y pierden sus electrones; las masas restantes, cargadas positivamente, son atraídas por el catodo y lo atraviesan por los agujeros hechos en el mismo.

Si por medio de un disco metálico *(anticatodo)*

(1) Las palabras griegas *anodo* y *catodo* están formadas por la voz *odos* (camino) y los prefijos *ana* (hacia arriba) y *kata* (hacia abajo).

son detenidos en su recorrido los electrones, su energía cinética es transformada en calor, en luz y en unos rayos especiales, cuya longitud de onda es 10000 veces

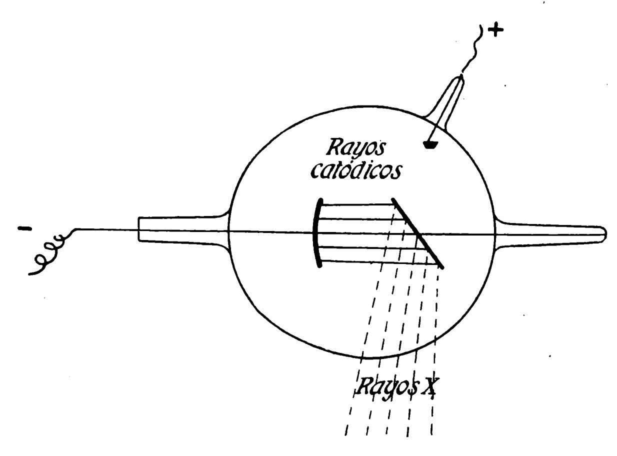


Fig. 23.

menor que la de la luz. Estos rayos son los denominados *rayos X* (fig. 23).

Utilización de la disgregación de los átomos de un filamento puesto a elevada temperatura en el vacío de una bombilla. Lámpara de dos electrodos o diodo.— En una bombilla se disponen una placa *P* y un filamento *F* (fig. 24). Enlacemos los extremos del filamento a un generador que lo ponga al rojo blanco, y la placa al polo positivo de otro generador. Se comprobará que el conductor que enlaza la placa al generador es recorrido por una corriente que va del generador a la placa. En efecto:

1.° La placa *P* ha tomado del generador la cantidad de electricidad necesaria para que pueda hallarse al mismo potencial que el polo a que se halla enlazada.

2.° Los electrones negativos que provienen de la disgregación de los átomos del filamento, después de proyectados, son atraídos por la carga positiva de la placa, y al llegar a ésta neutralizan una cantidad de electricidad positiva igual a la negativa que llevan. Así, la placa pierde una parte de su carga, su potencial tiende a descender, pero el generador sostiene su potencial y, por consecuencia, provee constantemente a *P* de una cantidad de electricidad igual a la neutralizada, de modo que el conductor *PA* es recorrido por una corriente que procede del transporte de electricidad positiva de *A* a *P* y, por ello, de sentido *AP*.

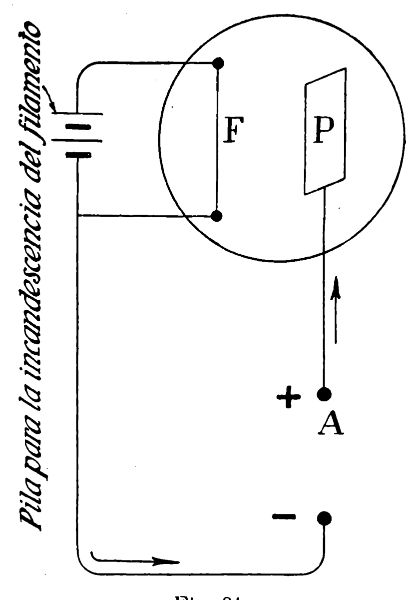


Fig. 24.

Si, además, el polo negativo del generador *A* se halla enlazado al filamento *F* (figura 24), la electricidad negativa de este generador es también transportada a la placa, y —con arreglo a la idea convencional de la página 38 sobre el sentido de la corriente — en el interior de la bombilla una corriente se dirige de la placa al filamento, todo ello como si el generador estuviese cerrado en un circuito continuo.

Cuando la placa *P* está unida al polo negativo del generador, se halla cargada de electricidad nega-

tiva que rechaza los electrones que proceden del filamento: por conservar así la placa su carga, no se produce ningún movimiento de electricidad en el conductor *AP*.

Si la placa se halla unida al electrodo de un generador de corriente alterna y, por consecuencia, electrizada alternativamente con cargas positiva y negativa, por *AP* no pasará corriente más que cuando este electrodo tenga una carga positiva y, por tanto, sólo en el sentido *AP*.

Así se comprende que semejante lámpara pueda ser empleada como *rectificador de corriente* o *válvula*.

Los electrones que parten del filamento, no todos son atraídos a la placa si no es suficiente la carga positiva, pero si ésta se aumenta, o sea, si se eleva el potencial del punto *A*, aumentará el número de electrones atraídos hacia *P*, así como la carga positiva procedente del generador, con lo cual la corriente en *AP* aumenta. Cuando el potencial baste para que todos los electrones procedentes del filamento lleguen a *P*, la cantidad de electricidad suministrada por el generador no aumentará ni aunque se eleve el potencial en *A*; la corriente en *AP* habrá llegado a su valor máximo, que toma el nombre de *corriente de saturación*.

Pero esta corriente de saturación aumenta si, al mismo tiempo, el filamento proyecta mayor cantidad de electrones, lo que ocurre cuando se eleva la temperatura del filamento alimentándolo con un generador de mayor tensión.

Lámpara de tres electrodos o triodo.—Es una lámpara en la cual se ha colocado, entre el filamento *F* y la placa *P*, una rejilla *G*, formada, por ejemplo, por un cuadro metálico, cuyo plano es paralelo al de la placa,

y sobre el cual se han tendido varios hilos metálicos también paralelos a la placa (fig. 25).

Como en la lámpara de dos electrodos, el filamento es calentado por algunos elementos de acumuladores y la placa está unida al polo positivo de un generador de potencial constante.

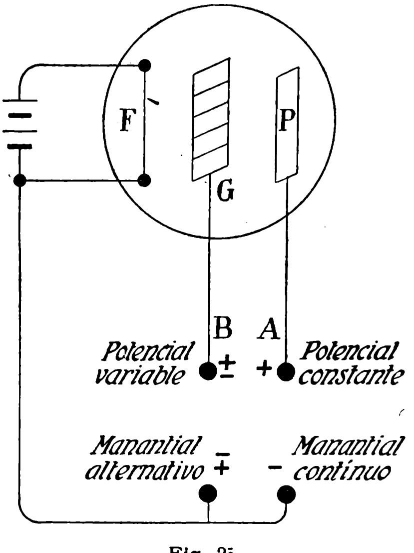


Fig. 25.

Si se une la rejilla a un punto B *de potencial variable en magnitud y en signo, estas variaciones se traducirán en otras respecto a la magnitud de la corriente en el conductor* AP, *corriente que, por lo demás, es siempre del mismo sentido.*

En efecto, supongamos que el punto *B* tenga un potencial negativo y de elevada magnitud; la rejilla *G*, cargada de electricidad negativa, rechaza los electrones proyectados por el filamento, de modo que ninguno llegue a la placa *P* y no hay corriente en *AP*. Si el potencial de *B* disminuye, simultáneamente disminuye la carga de *G* y llega un momento en que no todos los electrones son rechazados y algunos salvan los intervalos entre los hilos metálicos de la rejilla y llegan a la placa, y se inicia entonces una corriente de poca intensidad en *AP*, que aumenta a medida que el potencial de *B* se aproxima a cero.

Cuando el potencial de *B* pasa a ser positivo, la

rejilla se carga de electricidad positiva que ejerce atracción sobre los electrones emitidos por el filamento, y una parte es neutralizada sobre la rejilla misma, pero en su casi totalidad llegan a la placa, y todavía aumenta la corriente en *AP*. Cuando el potencial de *B* toma tal valor que todos los electrones que parten del filamento llegan a la placa a través de la rejilla, la corriente en *AP* llega a su máximo.

Si el potencial de *B* sigue elevándose, mayor número de electrones son detenidos por la rejilla, llegan en menor cantidad a la placa y, por tanto, la corriente en *AP* disminuye.

Esta corriente en *AP* se denomina *corriente de placa*.

Además, mientras el potencial de *B* es negativo, ninguna corriente pasa por *BG*, ya que nada modifica la carga de la rejilla; pero cuando se convierte en positivo, los electrones que proceden del filamento neutralizan una parte de la carga positiva de la rejilla y una corriente —que crece al mismo tiempo que el potencial de *B*— pasa por *BG*: es la denominada *corriente de rejilla*.

Si, como indica la figura 25, el segundo polo del generador variable se une al filamento, circulará —cuando *B* tenga potencial positivo—una corriente por el circuito *BGF*, como se ha dicho al hablar de la corriente de placa.

Curvas características de las corrientes de placa y de rejilla.—Las variaciones de la corriente de placa, en función de los valores del potencial de *B*, se traducen gráficamente por la curva *VMNR* (fig. 26).

Sobre la recta *OX*, a partir de *O*, se han llevado los valores del potencial de *B*, hacia la derecha cuando son positivos, y hacia la izquierda si son negativos. Para cada valor de este potencial, sobre perpendicu-

lares a OX, se han tomado longitudes proporcionales a los valores de la corriente de placa.

La corriente de placa empieza cuando el potencial de B tiene el valor negativo OV, y aumenta hasta que el potencial de B llega a un valor positivo OS, alcanzando entonces su valor máximo, que después va disminuyendo a medida que el potencial aumenta.

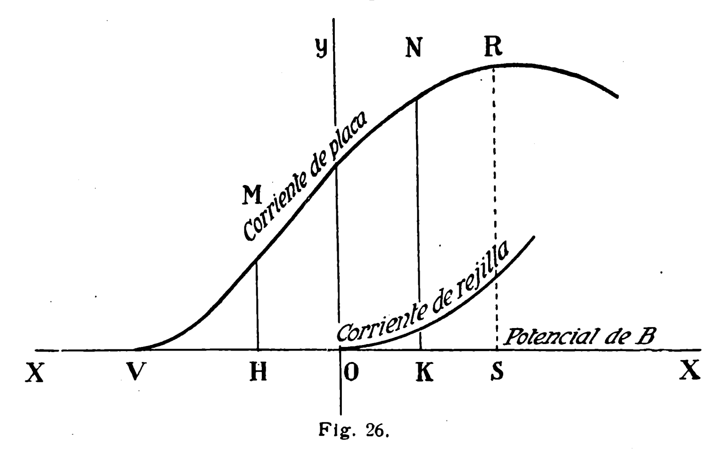


Fig. 26.

Se ve, pues, que *si el potencial de* B *oscila entre dos valores* OH, OK, *la corriente de placa oscilará entre los dos valores* HM, KN.

Respecto a la corriente de rejilla, no empieza hasta que el potencial de B es positivo y aumenta simultáneamente con él.

Estos fenómenos han sido utilizados en la telegrafía y telefonía sin hilos.

Disociación de las moléculas. — Iones

Un cuerpo de composición química perfectamente definido (azufre, cloruro sódico, sulfato de cobre, etc.), es un conjunto de moléculas iguales, siendo la *molécula*

la más pequeña parte de este cuerpo con sus mismas propiedades químicas.

Salvo rarísimas excepciones, la molécula de un cuerpo simple está formada por varios átomos iguales: así, la molécula de oxígeno tiene dos átomos de oxígeno; la molécula de un cuerpo compuesto hállase constituída por un número más o menos grande de átomos: así, la molécula de cloruro sódico (NaCl), o sal común, tiene un átomo de cloro y otro de sodio; la de sulfato de cobre (SO^4Cu), resulta de la combinación de un átomo de azufre, cuatro de oxígeno y otro de cobre.

Los átomos, como hemos visto, se hallan en estado neutro, puesto que poseen cargas iguales de electricidad positiva y negativa; por tanto, si las moléculas no han sido sometidas a la acción de un generador eléctrico, serán también neutras.

Bajo determinadas influencias, las moléculas son disociadas en dos grupos de átomos, que reciben el nombre de iones: uno de ellos cargado de electricidad positiva y el otro de igual cantidad de electricidad negativa.

Esta disociación se produce: por la disolución de los cuerpos, por la acción de los rayos catódicos y de los rayos X, por las radiaciones de los cuerpos radioactivos, por los rayos ultravioleta, por los choques de iones con moléculas, por el calor y por determinadas acciones químicas.

Disociación por disolución. — Cuando una sal se halla en disolución, determinado número de sus moléculas se disocian en dos iones, y el número de moléculas así disociadas es tanto mayor cuanto más diluída se halla la solución. Así, en una disolución de sal (cloruro sódico) en el agua, se encuentran *iones cloro* cargados de electricidad negativa y *iones sodio* car-

gados de electricidad positiva. Estos iones, además, difieren esencialmente de los átomos de estos mismos cuerpos, no sólo por sus cargas, sino también por sus propiedades; así, el ion sodio puede hallarse en el agua sin que ejerza acción alguna sobre ella, mientras que el átomo sodio se halla en estado neutro y la descompone formando un óxido que se combina con el agua para formar la base sosa cáustica.

Electrolisis.—Si en la disolución de sal se sumergen los electrodos positivo y negativo de un generador, los iones libres y electrizados por la disolución pasan, los que están cargados de electricidad positiva al catodo (electrodo negativo), y se llaman *cationes,* y los que se hallan cargados de electricidad negativa al anodo (electrodo positivo), denominándose *aniones* [1]. Al llegar a estos electrodos, los iones ceden sus cargas y vuelven al estado de átomos neutros. Los iones desaparecidos son inmediatamente sustituídos por otros que proceden de la disociación de otras moléculas de sal.

Así, la disolución del sulfato de cobre (SO^4Cu) disocia un determinado número de moléculas de esta sal en *iones cobre* electrizados positivamente y en *iones* SO^4 electrizados negativamente.

Esta disociación explica la conductibilidad de determinados líquidos y los fenómenos de electrolisis que estudiaremos más adelante.

Ionización de los gases

Las moléculas de los gases, bajo las influencias ya enumeradas (rayos ultravioleta, rayos X, etc.), se

[1] Las voces *anion* y *cation* se derivan de la griega *iôn*, cuyo significado es, *que viaja.*

disocian, como se ha dicho al tratar de los líquidos, en iones positivos y iones negativos. Cuando un determinado número de moléculas de un gas ha sido disociado de este modo, se dice que tal gas está *ionizado*.

Si un cuerpo electrizado se encuentra, por ejemplo, en aire ionizado, se descarga y vuelve al estado neutro: es que, en efecto, si se halla cargado de electricidad positiva, atrae a sí iones negativos y cada uno de éstos neutraliza una cantidad de electricidad igual a su propia carga; y si se halla cargado negativamente, lo neutralizan los iones positivos.

Esta ionización permite explicar, en un gran número de casos, las descargas de los conductores electrizados.

CAPÍTULO IV

Electrodinámica

Cuando la electricidad se mueve a lo largo de los conductores, se producen fenómenos cuyas leyes tienen gran importancia en la teoría y en la técnica. El estudio de estos fenómenos y de estas leyes constituye la Electrodinámica.

Para simplificar tal estudio, convendremos en admitir que una sola clase de electricidad es la que circula por los conductores, como un líquido o un gas circulan por una cañería. Ya hemos dicho que, en realidad, no ocurre nada de esto, pero que los resultados a que se llega, tanto por lo que se refiere a los fenómenos como a las magnitudes que en ellos intervienen, son los mismos que si aquella hipótesis fuera cierta. Por esta razón, empezaremos por comparar la electricidad en movimiento con el agua que circula por una tubería.

Trabajo en el movimiento del agua. — Hemos dicho en el capítulo primero que las magnitudes que caracterizan al trabajo mecánico son: la fuerza que lo produce y el camino recorrido por su punto de aplicación.

Análogamente determinaremos las magnitudes que caracterizan a la energía eléctrica; pero es imposible definirlas aquí de una manera precisa porque nos veríamos obligados a extendernos en consideraciones

impropias de este tratado elemental. Daremos únicamente una idea de lo que son estas magnitudes, y para ello nos valdremos de la analogía que existe entre los fenómenos eléctricos y algunos fenómenos hidráulicos, especialmente los de salida y corriente de los líquidos.

Materializaremos por un momento la electricidad imaginándonos que se propaga en los conductores

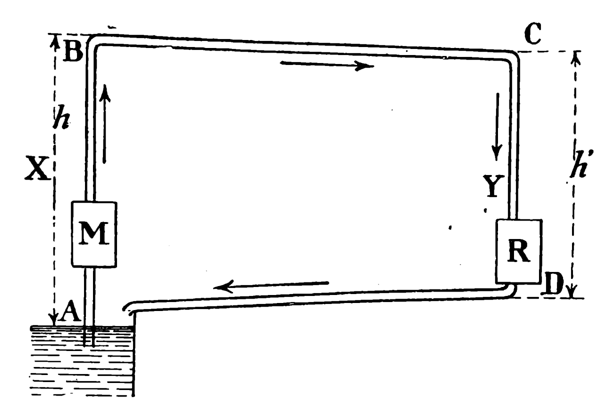


Fig. 27.

como el agua corre por los tubos o cañerías. Basta con hacer una simple comparación de los fenómenos, sin necesidad de establecer la identidad entre ellos.

Supongamos, pues, una instalación hidráulica destinada a transportar la energía desde un punto *X* a otro punto *Y* más o menos alejado del primero (fig. 27).

Esta instalación estará formada, por ejemplo, del modo siguiente:

En *X*, una máquina *M* eleva el agua desde el nivel inferior *A* al nivel superior *B*; desde este punto hasta el *Y* corre el agua por una tubería inclinada: al llegar a *Y* cae bruscamente de *C* a *D* en otra máquina, una

turbina por ejemplo, R, que se pone en movimiento pudiendo efectuar un trabajo utilizable. El agua que sale de R vuelve, siguiendo una pendiente suave DA, a su punto de partida X.

Sea Q kilogramos el peso del agua elevada por la máquina durante t segundos, y sea h metros la diferencia de nivel entre A y B. El trabajo efectuado por esta máquina es $(Q \times h)$ kilográmetros y siendo la duración de este trabajo de t segundos, su potencia es

$$\frac{Q \times h}{t} \text{ ó } \left(\frac{Q}{t} \times h\right) \text{kilográmetros por segundo.}$$

Ahora bien, $\frac{Q}{t}$ representa la cantidad de agua elevada por segundo de A a B: esto es, el *gasto* de agua en la tubería. La potencia de la máquina M es igual, por tanto, al producto del gasto del agua transportada de X a Y, por la diferencia de nivel entre A y B. La altura h expresa la presión hidrostática entre A y B.

Para llevar el agua de B a C y volverla de D a A es preciso que haya una cierta pérdida de presión, de modo que al llegar a Y la presión esté medida por h', menor que h. La pérdida de presión en la tubería es, por consiguiente, $h - h'$.

En Y, los $\frac{Q}{t}$ kilogramos de agua caen en un segundo de la altura h' en R y, por lo tanto, dan una potencia utilizable de $\frac{Q}{t} \times h'$.

De aquí se deduce que en la tubería hay una pérdida de potencial igual a

$$\left(\frac{Q}{t} \times h\right) - \left(\frac{Q}{t} \times h'\right) \text{ o sea: } \frac{Q}{t}(h - h'),$$

que es el producto del gasto por la pérdida de presión.

Por consiguiente, las magnitudes que caracterizan esta instalación, desde el punto de vista de la energía que entra en juego, son:

1.º Diferencia de nivel o presión, expresada en metros;

2.º Cantidad de agua transportada, expresada en kilogramos;

3.º Gasto o cantidad transportada por segundo, expresada en kilogramos por segundo.

Instalación eléctrica.—El mismo resultado, esto es, el transporte de la energía de un punto a otro, se puede obtener también por medio de una instalación eléctrica. Esta, análogamente a la instalación hidráulica, comprenderá:

1.º Una máquina generatriz (pilas, acumuladores, dinamo, alternador), que tendrá por efecto crear entre dos de sus puntos una diferencia de nivel eléctrico que se designa con el nombre de *diferencia de potencial* o *tensión*.

2.º Conductores semejantes a los conductos de agua, por donde pasará la *corriente eléctrica* y en los cuales se transportará una cierta *cantidad de electricidad*.

En estos conductores se producirá una pérdida de tensión y una pérdida de potencia.

3.º Un receptor, esto es, una máquina que recibirá la energía transportada y la transformará en aquella forma para cuya obtención se ha hecho la instalación, por ejemplo, en trabajo mecánico.

La energía eléctrica así puesta en juego quedará definida por las magnitudes siguientes:

1.ª Diferencia de potencial o tensión;

2.ª Cantidad de electricidad;

3.ª Cantidad de electricidad transportada por segundo.

Diferencia de potencial: volt.—Según hemos dicho, la diferencia de nivel eléctrico creado por la máquina toma el nombre de diferencia de potencial (*d. d. p.*) o tensión. Se expresa en *volts* y se mide por medio de un voltímetro.

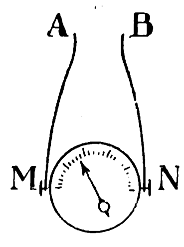


Fig. 28.

Voltímetro.—Un voltímetro (fig. 28) tiene dos bornes *M*, *N*; para medir la diferencia de potencial que existe entre dos puntos *A* y *B*, se unen estos puntos a los bornes *M*, *N*. Una aguja se mueve sobre una esfera dividida, graduada en volts, y da el valor de la *d. d. p.* medida.

Cantidad de electricidad: coulomb.—En una tubería o canalización hidráulica, una corriente de agua transporta durante un tiempo determinado una cierta cantidad de agua que puede medirse y expresarse en litros: del mismo modo, una corriente eléctrica transporta en un tiempo dado una cierta cantidad de electricidad. La unidad de cantidad de electricidad se llama *coulomb*.

Intensidad de una corriente eléctrica: ampere. —La intensidad de una corriente es la cantidad de electricidad transportada por la corriente en *un segundo:* la unidad de intensidad es, por consiguiente, la intensidad de una corriente que transporta en un segundo la unidad de cantidad de electricidad, es decir, un coulomb. Esta unidad se llama *ampere*.

Una corriente tendrá una intensidad de 20 amperes si transporta 20 coulombs por segundo.

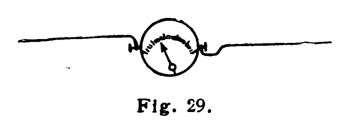
Otra unidad de cantidad: ampere-hora.—De la definición anterior resulta que el número que mide la cantidad de electricidad es igual al número que mide la intensidad multiplicado por el número que mide el tiempo. Siendo la unidad de intensidad el ampere, si se adopta como unidad de tiempo la hora, se obtendrá una nueva unidad de cantidad: el *ampere-hora,* esto es, la cantidad de electricidad transportada en una hora por una corriente cuya intensidad es de un ampere.

Del mismo modo se hubiera podido llamar al coulomb, ampere-segundo.

Se ve fácilmente que:

1 ampere-hora = 3600 ampere-segundos = 3600 coulombs.

Amperímetro.—La intensidad de una corriente se mide por medio de un amperímetro. Este aparato está colocado de modo que lo atraviese la corriente; una aguja indica sobre la graduación del amperímetro la intensidad en amperes de la corriente medida (fig. 29).


Fig. 29.

El esquema siguiente (fig. 30) indica la disposición de un amperímetro y de un voltímetro destinados

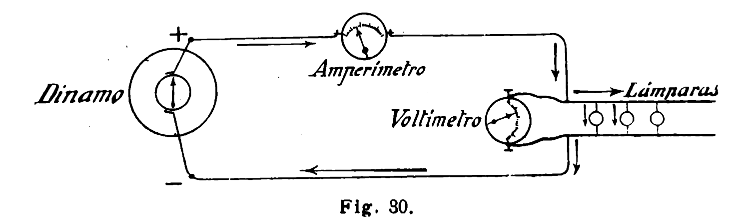


Fig. 30.

a medir respectivamente la intensidad de la corriente en un grupo de lámparas alimentadas por una dinamo, y la diferencia de potencial entre los extremos de este

grupo. Más adelante estudiaremos detenidamente estos dos aparatos.

Polos.—Los dos puntos entre los cuales la generatriz produce y mantiene una diferencia de potencial reciben el nombre de *polos* de la máquina.

El punto correspondiente al nivel más alto es el *polo positivo* (+), el otro es el *polo negativo* (—).

La corriente tiene un sentido determinado: sale de la máquina por el polo + y vuelve por los conductores exteriores al polo — , de modo que la máquina es recorrida por la corriente en el interior, del polo — al polo +.

Potencia.—Sabemos que si de una altura h caen Q kilogramos de agua por segundo, la potencia del salto es $(Q \times h)$ kilográmetros por segundo (presión × gasto).

Análogamente, si entre dos puntos de un conductor hay una *d. d. p.* de u volts, y si la intensidad de la corriente que recorre el conductor es de I amperes, la potencia desarrollada tiene por valor: $u \times I$.

Ahora bien, las unidades de diferencia de potencial y de intensidad, el volt y el ampere, están tomadas de tal modo que el producto u (volts) × I (amperes) represente watts, o mejor dicho, que el valor numérico de la potencia expresada en watts sea igual al producto del valor numérico de la tensión expresada en volts por el valor numérico de la intensidad expresada en amperes.

Por consiguiente, la potencia es:

$$W = u \times I \text{ watts.}$$

Energía eléctrica. — La energía puesta en juego durante el tiempo t será:

$$u \times I \times t;$$

si t son segundos, esta energía vendrá expresada en watt-segundos o joules; si t son horas, la energía estará expresada en watt-horas.

EJEMPLO. —*Entre los dos bornes de una dinamo existe una d. d. p. de 110 volts; estos bornes están unidos a un conductor colocado en un depósito que contiene 15 litros de agua a 10°. La energía gastada en este conductor se emplea por completo en calentar el agua, cuya temperatura se eleva a 90° al cabo de media hora. Hay que hallar la intensidad de la corriente* (figura 31).

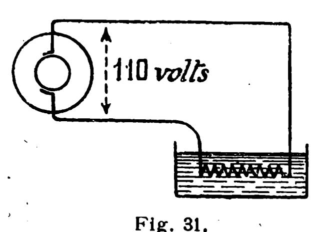


Fig. 31.

La temperatura ha subido desde 10° hasta 90°, o sea 80°; la cantidad de calor que se ha invertido en elevar 15 litros de agua de 10° a 90° es:

$$80 \times 15 = 1200 \text{ calorías grandes.}$$

El trabajo producido por la dinamo ha sido, por lo tanto:

$$1200 \times 4180 = 5016000 \text{ joules,}$$

puesto que una caloría grande equivale a 4180 joules.

El tiempo empleado en efectuar este trabajo es media hora, o sea 1800 segundos: luego la potencia de la dinamo es:

$$\frac{5016000}{1800} = 2787 \text{ joules por segundo}$$

o sea, 2787 watts.

Si I es la corriente que se busca, siendo la *d. d. p.*

entre los bornes de la generatriz de 110 volts, la potencia de la máquina será:

$$110 \times I \text{ watts};$$
$$110 \times I = 2787,$$

luego

$$I = \frac{2787}{110} = 25{,}3 \text{ amperes.}$$

Ley de Ohm

La experiencia nos dice que si entre los extremos de un conductor se tienen diferencias de potencial u, u', u'', ... este conductor es recorrido por corrientes I, I', I'', ... tales que:

$$\frac{u}{I} = \frac{u'}{I'} = \frac{u''}{I''} = \dots$$

Resistencia de un conductor: ohm.—De la ley anterior se deduce que la relación entre la diferencia de potencial existente en los extremos de un conductor y la intensidad de la corriente que lo recorre es un número constante:

$$\frac{u}{I} = R.$$

Este número constante R se llama *resistencia* del conductor.

Si $u = 1$ e $I = 1$, resulta $R = 1$; luego la unidad de resistencia es la de un conductor tal que la corriente que lo recorre es de 1 ampere cuando la diferencia de potencial entre sus extremos es de 1 volt. Esta unidad ha recibido el nombre de *ohm legal* y está representada por la resistencia que opone al paso de la corriente

una columna de mercurio de 1 milímetro cuadrado de sección y de 106,0 centímetros de longitud a 0° (1).

Se emplea ordinariamente un múltiplo y un submúltiplo de esta unidad, que son:

El megohm, que vale un millón de ohms:

$$1 \text{ megohm} = 10^6 \text{ ohms};$$

el microhm, que vale una millonésima de ohm:

$$1 \text{ microhm} = \frac{1}{10^6} \text{ ohm}.$$

Resistividad.—La experiencia enseña que la resistencia de un conductor es proporcional a su longitud e inversamente proporcional a su sección, de modo que la resistencia de un conductor de longitud l y de sección s tiene un valor que puede ponerse bajo la forma:

$$R = a \times \frac{l}{s};$$

a es una constante que se designa con el nombre de *resistividad* de la sustancia de que está hecho el conductor.

Si $l = 1$ y $s = 1$, se tiene $R = a$; luego la resistividad de una sustancia conductora es la resistencia de un hilo cilíndrico de esta sustancia que tiene la unidad de longitud y la unidad de sección. Si se toma por unidad de longitud el centímetro y por unidad de superficie el centímetro cuadrado, la resistividad es igual al número que mide la resistencia de un hilo de esta sustancia de 1 centímetro de longitud y

(1) Hoy el *ohm legal* se ha sustituído por el *ohm internacional*, que es la resistencia ofrecida al paso de una corriente eléctrica constante, por una columna de mercurio que, a la temperatura de 0° C., tiene una longitud de 106,3 cm., una sección constante y una masa de 14,4521 gramos.—N. DEL T.

1 centímetro cuadrado de sección. Se expresa generalmente en microhms y se dice que la resistividad está dada en «microhms-centímetro». Por ejemplo, la resistividad del cobre puro es de 1,8 microhms-centímetro a 15° [1].

Cálculo de la resistencia de un conductor.—Sea *a* microhms-centímetro la resistividad de un metal o de una aleación; la resistencia de un hilo de *l* centímetros de longitud y de *s* centímetros cuadrados de sección, será, según lo que hemos dicho:

$$R = a \times \frac{l}{s} \text{ microhms,}$$

o sea:

$$R = \frac{a \times l}{10^6 \times s} \text{ ohms.}$$

Conociendo la resistividad en microhms-centímetro de una sustancia, calcular su resistividad en ohms-milímetro cuadrado por metro. — Ordinariamente, la longitud de un conductor está dada en metros, y su sección en milímetros cuadrados; como los formularios indican generalmente la resistividad de las sustancias conductoras en microhms-centímetro, es de gran interés poder obtener rápidamente la resistencia de un hilo de 1 metro de longitud y de 1 milímetro cuadrado de sección, expresada en ohms.

Siendo *a* la resistividad en microhms-centímetro,

[1] La resistividad del cobre puro es de 1,592 microhms-centímetro a 0°, es decir, que teniendo en cuenta el coeficiente de temperatura, que es 0,00388, resulta para los 15° una resistividad de 1,685, o sea 1,7, que es el valor que ordinariamente se adopta. En los cálculos industriales se toma el valor 1,8 para compensar los eventuales excesos de temperatura o las impurezas del cobre comercial.—N. DEL T.

un hilo de 1 metro ó 100 centímetros de longitud y de 1 milímetro cuadrado ó $\frac{1}{100}$ de centímetro cuadrado de sección, tendrá una resistencia de:

$$\frac{a}{10^6} \times \frac{100}{\frac{1}{100}} = \frac{a \times 100 \times 100}{10^6} = \frac{a}{100} \text{ ohms.}$$

EJEMPLO.— *Un hilo de cobre tiene 2 kilómetros de longitud y 3 milímetros cuadrados de sección; ¿cuál es su resistencia?*

La resistividad del cobre es 1,8 microhms-centímetro, o sea $\frac{1,8}{100}$ ohm para un hilo de 1 metro de longitud y 1 milímetro cuadrado de sección. La resistencia buscada será:

$$R = \frac{1,8}{100} \times \frac{2000}{3} = 12 \text{ ohms.}$$

Variación de la resistividad con la temperatura.— La resistividad de los metales aumenta con la temperatura.

Sea a_0 la resistividad de un metal a 0°; si la temperatura del metal se eleva a t°, su resistividad aumenta y se hace $a_t > a_0$. La experiencia demuestra que a_t está dada por la relación:

$$a_t = a_0 (1 + Kt).$$

El valor de K depende de la naturaleza del metal y recibe el nombre de «coeficiente de aumento de resistencia con la temperatura» o solamente *coeficiente de temperatura* de este metal.

Si se conoce la resistividad a_t a t°, de una sustan-

cia cuyo coeficiente de temperatura es K, la resistividad de esta sustancia a 0° será:

$$a_0 = \frac{a_t}{1 + Kt},$$

y a t'°:

$$a_{t'} = a_0 (1 + Kt');$$

de donde:

$$a_{t'} = a_t \times \frac{1 + Kt'}{1 + Kt}$$

o también, aproximadamente:

$$a_{t'} = a_t [1 + K(t' - t)].$$

De aquí se deduce evidentemente que si R_t es la resistencia a t° del conductor, su resistencia a t'° será:

$$R_{t'} = R_t [1 + K(t' - t)].$$

EJEMPLO.— *Un conductor de cobre tiene una resistencia de 125 ohms a 15°; a* t° *tiene una resistencia de 150 ohms. Calcular la temperatura* t, *sabiendo que el coeficiente de temperatura del cobre es 0,004.*

Se tiene:

$$R_t = R_{15} [1 + 0{,}004 (t - 15)]$$

o bien:

$$150 = 125 [1 + 0{,}004 (t - 15)],$$

de donde:

$$25 = 125 \times 0{,}004 (t - 15),$$

$$t - 15 = \frac{25}{0{,}5} = 50^{\circ},$$

$$t = 50 + 15 = 65^{\circ}.$$

OBSERVACIÓN.—La resistividad de ciertos cuerpos, al contrario de lo que sucede en los metales, dismi-

nuye cuando se eleva su temperatura. Estos son, principalmente: el carbón, algunos óxidos refractarios, como los óxidos de torio, de zirconio, de cerio, de itrio y algunas aleaciones de manganeso.

RESISTIVIDAD DE METALES Y ALEACIONES USUALES EN MICROHMS-CENTÍMETRO A 15°

		Coeficientes de temperatura
Oro	2,2	0,00365
Plata	1,6	0,00385
Cobre	1,8	0,00388
Aluminio	3	0,00390
Hierro	10,4	0,0050
Plomo	20,7	0,00387
Níquel	13	0,0050
Platino	9,4	0,00247
Zinc	5,9	0,00365
Estaño	14,2	0,00365
Hierro-níquel	73,8	0,00093
Maillechort (plata alemana)	30	0,0004
Manganina	46,7	0,000025
Niquelina	35	0,0003
Constantán	50	0
Rhéotan	52	0,0004

En esta tabla se ve que la mayor parte de los metales puros tienen un coeficiente de temperatura igual a 0,004 aproximadamente, es decir, que sus resistividades aumentan 0,4 por 100 por grado.

Las aleaciones de níquel y de manganeso tienen una resistividad bastante elevada y sus coeficientes de temperatura son muy pequeños. Por esta razón se utilizan estas aleaciones para la construcción de grandes resistencias en que los valores hayan de permanecer sensiblemente constantes. En el comercio se conocen estas aleaciones con los nombres de: hierro-

níquel, maillechort, niquelina, manganina, rhéotan, constantán, etc.

Los números que figuran en esta tabla no pueden considerarse como rigurosamente exactos, pues tanto la resistividad de los metales como la de sus aleaciones depende de su estado de pureza y de su preparación. Estos números representan un valor medio aproximado de sus resistividades.

Conductancia.—Se llama conductancia de un conductor a la inversa de su resistencia: si R es la resistencia de este conductor, su conductancia es $\frac{1}{R}$. La unidad de conductancia, empleada muy raramente, es el *mho,* que es la conductancia de un conductor cuya resistencia es de 1 ohm.

La *conductibilidad* o *conductividad* de una sustancia es la inversa de su resistividad (1).

Consecuencia de la ley de Ohm.—De todo lo anteriormente expuesto resulta que la ley de Ohm puede enunciarse del modo siguiente:

Si entre los extremos de un conductor recorrido por una corriente de I amperes, hay una diferencia de potencial de u volts, la resistencia de este conductor es:

$$R = \frac{u}{I} \text{ ohms}; \qquad I = \frac{u}{R} \text{ amperes,}$$

es decir, que si entre los extremos de un conductor de

(1) Comercialmente se valúa el poder conductor del cobre industrial y de los demás materiales empleados como conductores por su *conductibilidad relativa,* o sea el valor de la conductibilidad comparada con la del llamado cobre patrón o Mathiessen, asignando a esta última el valor 100.

Designando por a y c respectivamente la resistividad y la conductibilidad del conductor de que se trata y por a' y c' las

R ohms de resistencia se aplica una diferencia de potencial de u volts, este conductor es recorrido por una corriente cuyo valor expresado en amperes es $\frac{u}{R}$.

La ley de Ohm puede escribirse también del modo siguiente:

$$u = R\,I \text{ volts},$$

o sea, que si un conductor de resistencia R ohms es recorrido por una corriente de I amperes, hay entre sus extremos una diferencia de potencial igual a RI volts.

Caída de tensión en un conductor.—Consideremos un circuito $ABCD$ en el que hay intercalada una

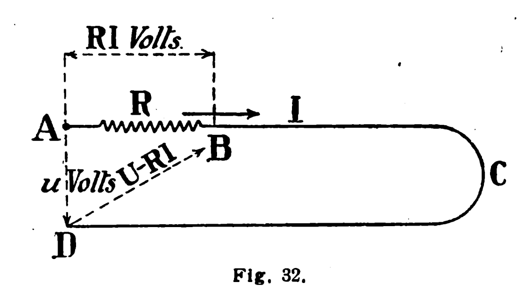


Fig. 32.

resistencia AB igual a R ohms, y sea I amperes la corriente en este circuito cuando se establece entre los extremos A y D una diferencia de potencial de u volts (figura 32).

mismas cantidades para el cobre patrón, la conductibilidad relativa c_r del primero viene dada por la fórmula:

$$c_r = 100\frac{c}{c'} \qquad \text{o bien} \qquad c_r = 100\frac{a'}{a}.$$

La resistividad a' en microhms-centímetro del cobre Mathiessen vale

$$a' = 1{,}598\,(1 + 0{,}00388\,t)$$

o muy aproximadamente

$$a' = 1{,}6\,(1 + 0{,}004\,t).$$ — N. DEL T.

Según la ley de Ohm, sabemos que entre A y B hay una diferencia de potencial igual a RI volts y que entre B y D sólo hay una diferencia de potencial igual a $u - RI$ volts.

Este hecho se expresa diciendo que en la resistencia AB se produce una caída de tensión igual a RI volts.

110 V

Fig. 33.

EJEMPLOS. — 1.° *Una lámpara de incandescencia de 32 bujías absorbe 1,5 watts por bujía y funciona bajo 110 volts. ¿Cuál es su resistencia?* (fig. 33).

La potencia absorbida por la lámpara es:

$$32 \times 1{,}5 = 48 \text{ watts.}$$

Esta potencia es igual al producto de la tensión aplicada entre los extremos, que es 110 volts, por la corriente I que recorre la lámpara; o sea:

$$110 \times I = 48; \qquad I = \frac{48}{110} = 0{,}436 \text{ amperes.}$$

Sea R la resistencia; según la ley de Ohm se tiene: $R = \frac{u}{I}$, por consiguiente:

$$R = \frac{110}{0{,}436} = 252 \text{ ohms.}$$

2.° *Una lámpara de arco funciona normalmente con una corriente de 5 amperes y una diferencia de potencial entre sus carbones de 40 volts. Se quiere alimentar con un generador de corriente que da una d. d. p. de 60 volts: ¿qué resistencia es preciso colocar en su circuito? Esta resistencia está formada por un hilo de maillechort que deja pasar 3 amperes por milímetro cuadrado de sección: ¿qué longitud deberá tener el hilo empleado?* (fig. 34).

Para tener 40 volts entre los carbones *A*, *B*, es preciso que una resistencia *R* intercalada en el cir-

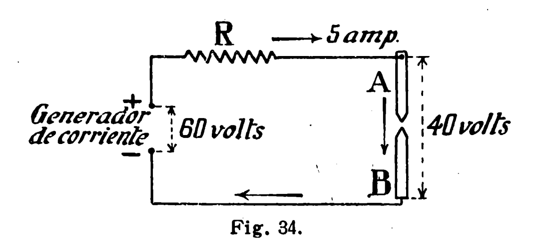


Fig. 34.

cuito produzca, al ser recorrida por una corriente de 5 amperes, una caída de tensión igual a

$$60 - 40 = 20 \text{ volts;}$$

por consiguiente, se deberá tener:

$$R \times I = 20; \qquad R \times 5 = 20; \qquad R = \frac{20}{5} = 4 \text{ ohms.}$$

Longitud del hilo.—Admitiendo que por milímetro cuadrado pueden pasar en esta resistencia 3 amperes, la sección ha de ser de $\frac{1}{3}$ de milímetro cuadrado por ampere y, por consiguiente, de $\frac{5}{3}$ de milímetro cuadrado para los 5 amperes.

La resistividad del maillechort es de 30 microhms-centímetro, o sea, según lo que hemos visto, $\frac{30}{100}$ ó $\frac{3}{10}$ de ohm para un hilo de 1 metro de longitud y de 1 milímetro cuadrado de sección.

Si l es la longitud en metros del hilo cuya sección es $\frac{5}{3}$ de milímetro cuadrado, su resistencia es:

$$\frac{3}{10} \times \frac{l}{\frac{5}{3}} = \frac{3}{10} \times \frac{3l}{5} = \frac{9l}{50},$$

y como esta resistencia debe ser de 4 ohms, se tiene:

$$\frac{9\,l}{50}=4; \quad 9\,l=50\times 4; \quad l=\frac{50\times 4}{9}=22^{m},2.$$

Ley de Joule

Si una resistencia de R ohms es atravesada por una corriente de I amperes, se calienta, y el calor desprendido equivale a una energía de RI^2 joules por segundo.

Se dice también que en una resistencia R atravesada por una corriente I, se produce una pérdida de energía que aparece bajo la forma de calor, cuyo valor es RI^2 joules por segundo, o sea una pérdida de potencia igual a RI^2 watts.

En efecto, entre los extremos de esta resistencia hay una diferencia de potencial $u = RI$ volts; siendo la corriente de I amperes, la potencia gastada en el conductor es $u \times I$ watts, o sea

$$RI\times I=RI^2 \text{ watts.}$$

Durante t segundos, la energía gastada es RI^2t joules que se transforma totalmente en calor. Se expresa ordinariamente este hecho diciendo que se produce en el conductor una pérdida de energía *por efecto Joule* igual a RI^2t.

EJEMPLO.—*Se quiere transportar a 500 metros de distancia una potencia de 50 caballos: la máquina generatriz produce en sus bornes una diferencia de potencial de 220 volts. ¿Qué sección ha de tener el conductor, sabiendo que la pérdida de potencia en la línea es igual al 20 por 100 de la potencia utilizada?* (figura 35).

La pérdida de potencia admitida en la línea según las condiciones del enunciado, se calculará mediante un sencillo producto; su valor es:

$$50 \times \frac{20}{100} = 10 \text{ caballos.}$$

La potencia que ha de proporcionar la generatriz será, por consiguiente:

$$50 + 10 = 60 \text{ caballos,}$$

o bien

$$60 \times 736 = 44160 \text{ watts.}$$

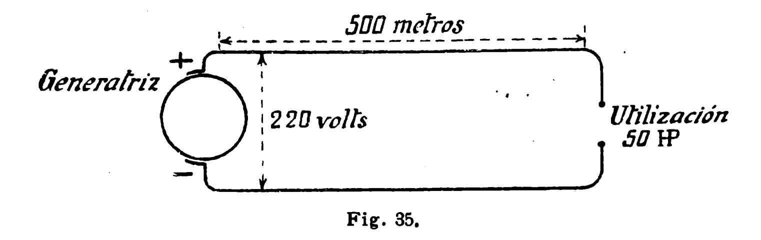


Fig. 35.

Como la diferencia de potencial es 220 volts, la corriente es:

$$I = \frac{44160}{220} = 200 \text{ amperes.}$$

La pérdida de potencia en la línea es RI^2, siendo R la resistencia de esta línea, y ha de ser igual a

$$10 \times 736 = 7360 \text{ watts;}$$

luego:

$$R \times 200^2 = 7360; \qquad R = \frac{7360}{40000} = 0,18 \text{ ohm.}$$

Sea s la sección del hilo en milímetros cuadrados: su longitud es:

$$2 \times 500 = 1000 \text{ metros,}$$

y su resistencia será:

$$\frac{1{,}8}{100} \times \frac{1000}{s} \text{ ohms,}$$

suponiendo que el hilo es de cobre, cuya resistividad es 1,8 microhm.

Ahora bien, esta resistencia tiene que ser igual a 0,18 ohm; luego:

$$\frac{1{,}8}{100} \times \frac{1000}{s} = 0{,}18; \qquad \frac{1{,}8 \times 10}{s} = 0{,}18,$$

de donde

$$s = \frac{18}{0{,}18} = 100 \text{ mm}^2 = 1 \text{ cm}^2.$$

Observación.—La caída de tensión en la línea es de RI, o sea:

$$0{,}18 \times 200 = 36 \text{ volts,}$$

de modo que la d. d. p. en los bornes del circuito de utilización es:

$$220 - 36 = 184 \text{ volts.}$$

CAPÍTULO V

Agrupamiento de los conductores

Los conductores pueden agruparse entre sí *cn serie* o *en paralelo.*

I.— Agrupamiento en serie

Los conductores se disponen unos a continuación de otros de tal modo, que todos sean recorridos por la misma corriente (fig. 36). En este caso:

R_1 R_2 R_3

A B C D

Fig. 36.

La resistencia del conjunto de estos conductores es igual a la suma de las resistencias de cada uno de ellos.

De modo que si un circuito está constituído por conductores de resistencias: R_1, R_2, R_3,... agrupados en serie, la resistencia total es:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Si en los extremos de este circuito se aplica una diferencia de potencial de u volts, la corriente en este circuito y por consiguiente en cada conductor es:

$$I = \frac{u}{R_1 + R_2 + R_3 + \dots}$$

Las diferencias de potencial entre los extremos de cada conductor son:

Entre A y B. . . . . . $u_1 = R_1 I$
» B y C. . . . . . $u_2 = R_2 I$
» C y D. . . . . . $u_3 = R_3 I$,

de donde:

$$u_1 + u_2 + u_3 = (R_1 + R_2 + R_3)\, I.$$

Pero hemos visto que

$$I = \frac{u}{R_1 + R_2 + R_3},$$

o sea que

$$u = (R_1 + R_2 + R_3)\, I;$$

luego

$$u = u_1 + u_2 + u_3 \ldots$$

Por consiguiente, la diferencia de potencial entre los extremos de un circuito formado por conductores en serie es igual a la suma de las diferencias de potencial que existen en cada uno de ellos.

OBSERVACIÓN.—Un circuito se llama *abierto* cuando está interrumpido en uno de sus puntos, no pudiendo entonces ser recorrido por una corriente. En el caso contrario se dice que es *cerrado*.

Fig. 37.

EJEMPLO.—Se pueden utilizar lámparas *idénticas* que funcionan bajo 110 volts, para un voltaje doble, 220 volts. Basta para ello agruparlas en serie de dos (fig. 37).

En efecto, sean 310 ohms la resistencia de cada lámpara, que en condiciones normales han de ser recorridas por una corriente I, tal que:

$$I = \frac{110}{310} = 0{,}355 \text{ ampere.}$$

Si se las agrupa en serie de dos, se tiene una resistencia igual a

$$310 \times 2 = 620 \text{ ohms.}$$

Por consiguiente, en cada una de ellas se tendrá una corriente igual a

$$\frac{220}{620} = 0{,}355 \text{ ampere,}$$

y en los extremos de cada una de ellas habrá una tensión igual a

$$310 \times 0{,}355 = 110 \text{ volts.}$$

Las dos lámparas funcionarán, pues, normalmente.

Pero supongamos que no sean idénticas y que una tenga una resistencia de 300 ohms y la otra de 320 ohms. La corriente normal en la primera debe ser:

$$\frac{110}{300} = 0{,}366 \text{ ampere;}$$

en la segunda:

$$\frac{110}{320} = 0{,}343 \text{ ampere.}$$

Cuando funcionan en serie, la resistencia total es:

$$300 + 320 = 620 \text{ ohms}$$

y la corriente en cada una de ellas:

$$\frac{220}{620} = 0{,}355 \text{ ampere,}$$

es decir, inferior a la corriente normal en la primera y superior a la corriente normal en la segunda.

En los bornes de la primera el voltaje será:

$$300 \times 0{,}355 = 106{,}50 \text{ volts,}$$

y en los bornes de la segunda:

$$320 \times 0,355 = 113,50 \text{ volts.}$$

El voltaje es, por consiguiente, demasiado pequeño en los bornes de la primera lámpara, y demasiado grande en los bornes de la segunda.

II. — Agrupamiento en paralelo o en derivación

Los extremos de los conductores están unidos a dos puntos o a dos conductores de resistencia despreciable A y B (figs. 38 y 39). La corriente I al llegar al punto A o al conductor A recorre cada uno de los

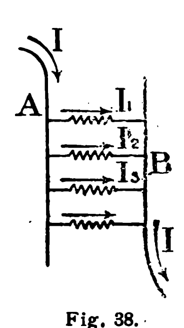


Fig. 38.

Fig. 39.

conductores de resistencias R_1, R_2, R_3, ... de modo que los conductores son recorridos por corrientes I_1, I_2, I_3, ...

Es evidente que en el punto A o en el conductor A no puede haber ni acumulación ni pérdida de electricidad; luego

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

Resistencia del agrupamiento.—Tiene un valor R que satisface a la siguiente condición:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots,$$

es decir, que un grupo de varios conductores en paralelo equivale, desde el punto de vista de la resistencia, a *un conductor único cuya conductancia es igual a la suma de las conductancias de cada uno de ellos.*

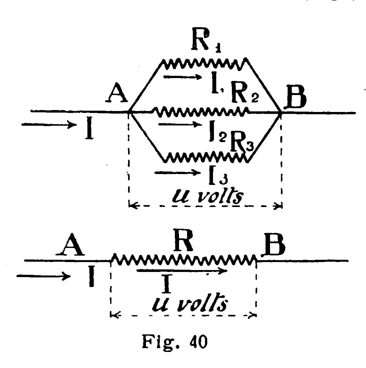


Fig. 40

En efecto, sea u volts la d. d. p. entre los puntos A y B (fig. 40). Se sabe que la d. d. p. entre los extremos de un conductor recorrido por una corriente es igual al producto de la resistencia del conductor por la intensidad de la corriente. Las corrientes en los conductores de resistencias R_1, R_2, R_3, ... serán por consiguiente I_1, I_2, I_3, ... que cumplirán con la condición:

$$(1) \qquad R_1 I_1 = R_2 I_2 = R_3 I_3 \ldots = u.$$

Si R es la resistencia única equivalente al grupo R_1, R_2, R_3, ... será recorrida por la corriente I y será tal que:

$$(2) \qquad RI = u.$$

De las igualdades (1) se deduce:

$$I_1 = \frac{u}{R_1}, \qquad I_2 = \frac{u}{R_2}, \qquad I_3 = \frac{u}{R_3};$$

luego:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \ldots = \frac{u}{R_1} + \frac{u}{R_2} + \frac{u}{R_3} + \ldots =$$

$$= u\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots\right).$$

Ahora bien, hemos dicho que:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots;$$

luego:

$$I = u\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots\right).$$

Además, de (2) se deduce:

$$I = \frac{u}{R};$$

igualando estos dos valores de I, se tiene:

$$u \times \frac{1}{R} = u \times \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots\right)$$

y finalmente:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

Valor de la intensidad de la corriente en cada conductor. — Hemos establecido las relaciones:

$$u = R_1 I_1 = R_2 I_2 = R_3 I_3$$

y

$$u = RI.$$

De ellas se deduce:

$$RI = R_1 I_1, \qquad RI = R_2 I_2, \qquad RI = R_3 I_3, \dots;$$

luego:

$$I_1 = \frac{RI}{R_1}, \qquad I_2 = \frac{RI}{R_2}, \qquad I_3 = \frac{RI}{R_3}, \dots;$$

R se calcula como ya hemos dicho, teniéndose así determinados valores de I_1, I_2, I_3, ...

EJEMPLO. — *Sea una corriente de 10 amperes derivada en tres conductores de resistencias, 5, 2 y 10*

ohms. ¿Cuál es la corriente en cada uno de ellos y la d. d. p. entre sus extremos?

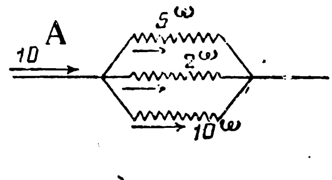


Fig. 41.

La resistencia del grupo de estas tres resistencias es R, tal que:

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{5}+\frac{1}{2}+\frac{1}{10},$$

de donde:

$$\frac{1}{R}=\frac{2}{10}+\frac{5}{10}+\frac{1}{10}=\frac{8}{10};$$

por consiguiente:

$$R=\frac{10}{.8}=\frac{5}{4}\text{ ohms.}$$

La corriente en el conductor de 5 ohms es:

$$I_1=\frac{\frac{5}{4}\times 10}{5}=\frac{50}{20}=2{,}5\text{ amperes;}$$

en el conductor de 2 ohms:

$$I_2=\frac{\frac{5}{4}\times 10}{2}=\frac{50}{8}=6{,}25\text{ amperes;}$$

en el conductor de 10 ohms:

$$I_3=\frac{\frac{5}{4}\times 10}{10}=\frac{50}{40}=1{,}25\text{ amperes.}$$

Se verifica evidentemente que:

$$I_1+I_2+I_3=10\text{ amperes.}$$

La diferencia de potencial entre los puntos de derivación es $R\ I$ o sea:

$$\frac{5}{4}\times 10=12\ 5\text{ volts}$$

Observación. — Cuando varios conductores de resistencias R_1, R_2, R_3 están en derivación, si se añade otro conductor de resistencia R' en derivación con los primeros, la resistencia del conjunto disminuye (fig. 42).

En efecto, antes de haber agregado el último conductor, la resistencia total era R, y

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3};$$

y después se ha hecho igual a

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R'}.$$

Fig. 42.

Luego $\frac{1}{R}$ ha aumentado y por consiguiente R ha disminuído.

Esto se comprende claramente, pues el efecto del conductor que se añade es el de proporcionar un nuevo paso a la corriente y, por consiguiente, disminuir la resistencia que presenta el conjunto de los conductores.

De aquí resulta evidentemente, que cuando varios conductores están agrupados en paralelo, la resistencia de su conjunto es inferior a la del conductor de menor resistencia.

En el ejemplo anterior se tenía, en efecto, la menor resistencia igual a 2 ohms y la resistencia total igual a $\frac{5}{4} = 1{,}25$ ohms.

Corto-circuito. — Si uno de los conductores derivados tiene una resistencia extremadamente pequeña, prácticamente nula, se dice que existe entre los dos puntos o entre los dos conductores así unidos un corto-

circuito. Si u es la d. d. p. entre estos dos puntos o conductores y R la resistencia del conductor que forma el corto-circuito, la corriente será $\frac{u}{R}$.

Como R es muy pequeña, I es muy grande, y en general, los conductores que atraviesan no pueden soportar el calentamiento que se produce, y se funden si no están resguardados por aparatos de protección que cortan la corriente, es decir, que cortan el circuito al cual pertenecen.

Casos particulares.—1.° *Caso de dos conductores en derivación.* — Sean r_1 y r_2 las resistencias de estos dos conductores, I_1 e I_2 la corriente en cada uno de ellos e I la corriente total (figura 43).

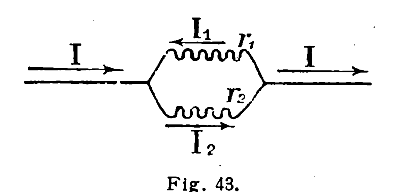


Fig. 43.

La resistencia del sistema de estos dos conductores es R, que cumple con la condición:

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}$$

o bien:

$$\frac{1}{R}=\frac{r_1+r_2}{r_1 r_2},$$

de donde:

$$R=\frac{r_1 r_2}{r_1+r_2}.$$

Por consiguiente: *la resistencia del sistema de dos conductores derivados es igual al producto de las resistencias de cada uno de ellos, dividido por su suma.*

Además, según hemos visto en el caso general, si u es la d. d. p. entre los extremos de las resistencias, se tiene:

$$u = RI;$$

$$u = r_1 I_1 = r_2 I_2;$$

luego:

$$RI = r_1 I_1, \qquad I_1 = \frac{RI}{r_1};$$

$$RI = r_2 I_2, \qquad I_2 = \frac{RI}{r_2};$$

y como $R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$, se tendrá:

$$I_1 = \frac{I}{r_1} \times \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad \text{o} \quad I_1 = I \times \frac{r_2}{r_1 + r_2},$$

$$I_2 = \frac{I}{r_2} \times \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad \text{o} \quad I_2 = I \times \frac{r_1}{r_1 + r_2}.$$

Por lo tanto: *la corriente en uno de los dos conductores derivados se obtiene multiplicando la corriente total por la resistencia del otro conductor y dividiendo el producto por la suma de las resistencias de los dos conductores.*

EJEMPLO. — *Un galvanómetro tiene una resistencia de 200 ohms y se pone en derivación con él una resistencia de 50 ohms; en serie con este grupo se pone una resistencia de 260 ohms.*

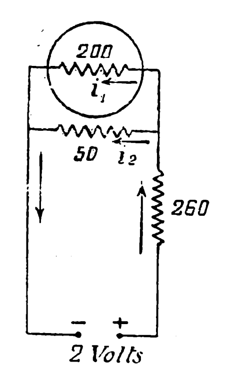


Fig. 44.

Entre los extremos del circuito así formado, se aplica una diferencia de potencial de 2 volts. ¿Cuál es la corriente total, la corriente en el galvanómetro y la corriente en la resistencia de 50 ohms? (fig. 44).

La resistencia del grupo formado por el galvanómetro y el conductor en derivación con él es:

$$\frac{200 \times 50}{200 + 50} = \frac{10000}{250} = 40 \text{ ohms.}$$

La resistencia total del circuito es, por consiguiente:

$$260 + 40 = 300 \text{ ohms}$$

y la corriente total I es:

$$I = \frac{2}{300} = \frac{1}{150} \text{ de ampere.}$$

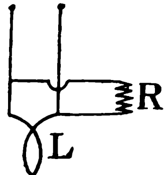
La corriente en el galvanómetro es:

$$i_1 = I \times \frac{50}{200 + 50} = \frac{1}{150} \times \frac{1}{5} = \frac{1}{750} \text{ de ampere,}$$

y el conductor de 50 ohms:

$$i_2 = I \times \frac{200}{200 + 50} = \frac{1}{150} \times \frac{4}{5} = \frac{4}{750} \text{ de ampere.}$$

OBSERVACIÓN. — Cuando se pone una resistencia en derivación con otra, se dice que aquélla está en *shunt* con ésta.



Lámpara L shuntada por la resistencia R.

Fig. 45.

En el ejemplo anterior, el galvanómetro está *shuntado* por la resistencia de 50 ohms. Cuando un conductor o un aparato está shuntado por una resistencia nula, se dice que este conductor o este aparato está puesto en cortocircuito. Es fácil ver directamente y por las fórmulas anteriores, que cuando un conductor está puesto en cortocircuito, no pasa ninguna corriente por este conductor.

2.º *Caso de varios conductores de igual resistencia.*—Sea un circuito constituído por n conductores de resistencia r. Se sabe que el sistema tiene una resistencia R tal, que:

$$\frac{1}{R} = \underbrace{\frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \dots + \frac{1}{r}}_{n}$$

es decir:

$$\frac{1}{R} = n \times \frac{1}{r}, \quad \text{de donde} \quad R = \frac{r}{n}.$$

Luego: *cuando varios conductores de igual resistencia están agrupados en paralelo, la resistencia de su conjunto es igual a la de uno de ellos dividida por el número de conductores.*

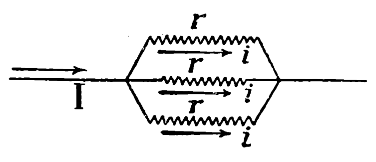


Fig. 46.

Es evidente que las corrientes son iguales en todos los conductores, y por tanto, que: *la corriente en cada uno de los conductores derivados es igual a la corriente total dividida por el número de conductores:*

$$i = \frac{I}{n}.$$

Ejemplo.—*Un taller está iluminado por 20 lámparas de incandescencia agrupadas en paralelo, teniendo cada una 200 ohms de resistencia; la instalación funciona bajo 110 volts. ¿Cuál es la corriente total y la corriente en cada lámpara?* (fig. 47).

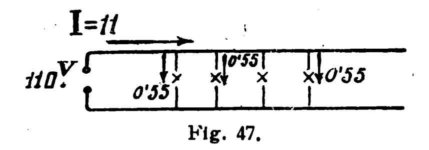


Fig. 47.

La resistencia total es:

$$\frac{200}{20} = 10 \text{ ohms.}$$

La corriente total es:

$$\frac{110}{10} = 11 \text{ amperes,}$$

y en cada lámpara:

$$\frac{11}{20} = 0{,}55 \text{ ampere.}$$

Reostato. — Un reostato es una resistencia variable destinada a ser intercalada en un circuito, sea en serie, sea en derivación, de modo que se pueda variar el valor de la resistencia de este circuito.

Hay muchas clases y formas de reostatos; en general están constituídos por un sistema de conductores *r* agrupados en serie (fig. 48).

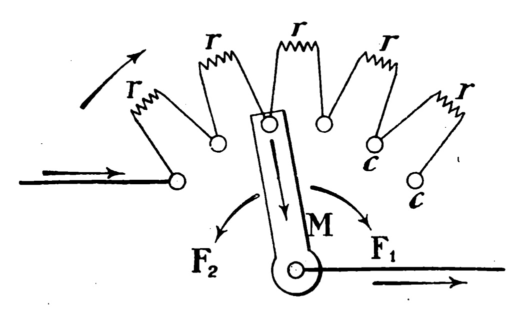


Fig. 48.

Los extremos de estos conductores están unidos a *contactos* o *topes* de cobre *c* sobre los cuales se puede apoyar el extremo de una manivela *M*.

Se ve que corriendo la manivela en el sentido de la flecha F_1, la resistencia total introducida en el circuito aumenta y que disminuye si la manivela se mueve en sentido F_2.

CAPÍTULO VI

Generalidades sobre los generadores y los receptores eléctricos

Generadores

Se llama generador o generatriz eléctrica a toda máquina capaz de convertir en energía eléctrica otra forma de la energía.

Los generadores utilizados en la industria son:

1.° Las pilas y los acumuladores que transforman la energía química;

2.° Las máquinas magneto y dinamo-eléctricas, y los alternadores que transforman la energía mecánica en energía eléctrica.

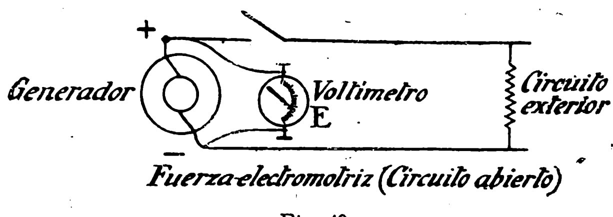
Fuerza electromotriz. — Ya hemos dicho que todo generador crea entre sus bornes una diferencia de potencial de u volts; bajo la influencia de esta diferencia de potencial, una corriente I recorre el circuito exterior en el cual se utiliza. Esta corriente atraviesa igualmente el circuito de la máquina, de modo que si r es la *resistencia interior* del generador, se produce en este circuito una caída de tensión igual a $r\ I$ volts.

Se llama *fuerza electromotriz* del generador a la suma $u + r\ I$ de la *diferencia de potencial en los bornes* y de la caída de tensión en el interior. Representándola por E, tendremos:

$$E = u + rI,$$

Es evidente que si $I = 0$, $E = u$.

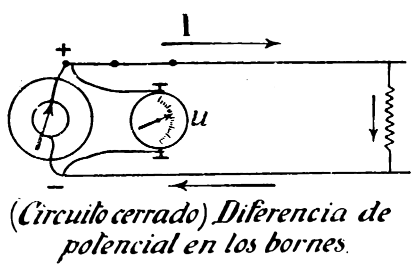
Luego la fuerza electromotriz de un generador está expresada por el mismo número que mide la diferencia de potencial entre sus bornes cuando no se produce ninguna corriente, es decir, cuando está en circuito abierto.



Fuerza electromotriz (Circuito abierto)

Fig. 49.

La diferencia de potencial en los bornes de un generador es siempre inferior a su fuerza electromotriz. Esto se comprueba fácilmente colocando entre los bornes de la máquina un voltímetro; cuando el circuito exterior es abierto (fig. 49), la máquina no produce ninguna corriente y el voltímetro indica la fuerza electromotriz E. Si se cierra el circuito de modo que pase una corriente I por el circuito exterior (fig. 50), el voltímetro indica un valor menor, que es la diferencia de potencial entre los bornes u. Se tiene:



(Circuito cerrado) Diferencia de potencial en los bornes.

Fig. 50.

$$E = u + rI; \quad \text{o bien,} \quad u = E - rI.$$

Observación. — La fuerza electromotriz es una constante del generador y es independiente del valor

de la resistencia del circuito exterior en que se utiliza la corriente; en cambio, la diferencia de potencial entre los bornes toma valores variables con la intensidad de la corriente producida por la máquina, esto es, con la resistencia del circuito exterior.

Corriente producida por un generador. — De la relación:

(1) $$E = u + rI$$

se deduce:

$$I = \frac{E - u}{r}.$$

Si R es la resistencia del circuito exterior, se tiene, según la ley de Ohm:

$$u = RI,$$

siendo u la diferencia de potencial aplicada en los extremos de la resistencia R recorrida por la corriente de I amperes.

De aquí se deduce:

(2) $$I = \frac{u}{R}.$$

Sustituyendo u por su valor en la igualdad (1), se tiene:

$$E = RI + rI,$$
$$E = (R + r) I,$$

de donde:

(3) $$I = \frac{E}{R + r}.$$

Por consiguiente, la corriente producida por el generador se obtiene:

O bien dividiendo el número que mide la diferencia

de potencial en los bornes por el que mide la resistencia del circuito exterior (2);

O bien dividiendo el número que mide la fuerza electromotriz por la suma de los números que miden la resistencia exterior y la resistencia interior (3).

Rendimiento. — La potencia utilizada en el circuito exterior es:

$$(u \times I) \text{ watts};$$

en el interior de la máquina, la potencia gastada por la corriente I al atravesar la resistencia interior r es, según la ley de Joule, $r\,I^2$; de modo que la potencia total producida por el generador es:

$$u\,I + r\,I^2,$$

o sea

$$(u + r\,I)\,I \text{ watts}.$$

Pero,

$$u + r\,I = E \text{ (fuerza electromotriz)};$$

luego la potencia desarrollada por la máquina tiene por valor $E\,I$ watts.

Ahora bien, sabemos que el rendimiento de una máquina es igual a la relación que hay entre la potencia utilizable recogida y la potencia suministrada a la máquina. Según el principio de la conservación de la energía, la potencia suministrada al generador es igual a la potencia total desarrollada, que es $E\,I$ watts. La potencia utilizable recogida es la producida en el circuito exterior, que es $u\,I$.

Por lo tanto, el rendimiento es:

$$\rho = \frac{u\,I}{E \cdot I} = \frac{u}{E}, \quad \text{o sea} \quad \rho = \frac{u}{u + r\,I}.$$

Observación. — Esta relación $\frac{u}{E}$ da el valor del *rendimiento eléctrico* del generador; en realidad su rendimiento es más pequeño, porque, además de las pérdidas por efecto Joule en el inducido, se producen otras pérdidas de energía que estudiaremos más adelante, de modo que la potencia suministrada al generador es mayor que EI watts.

Receptor

Un receptor es un aparato que convierte la energía eléctrica en otra forma de la energía.

Los principales receptores son:

Los motores o receptores mecánicos;

Las lámparas y aparatos de calefacción o receptores térmicos;

Las cubas electrolíticas y los acumuladores en carga o receptores químicos.

Fuerza contra-electromotriz. — Consideremos un motor eléctrico, y veremos que está construído, generalmente, del mismo modo que un generador; bajo la influencia de la corriente que recibe, gira, y se encuentra en las mismas condiciones que un generador accionado por el efecto de una potencia mecánica.

Por consiguiente, se origina una fuerza electromotriz en la máquina, opuesta a la diferencia de potencial aplicada, que recibe el nombre de *fuerza contra-electromotriz* del motor.

De aquí resulta que si se aplica una diferencia de potencial de u volts entre los bornes del motor, queda equilibrada:

1.° Por la fuerza contra-electromotriz E' desarrollada;

2.° Por la caída de tensión $r\,I$ en el interior del motor, siendo r la resistencia, e I la corriente que lo atraviesa.

Por lo tanto se puede escribir:

u	=	E'	+	$r\,I$
d. d. p. aplicada		fuerza contra-electromotriz		caída de tensión en el interior

Si se impide la rotación del motor, no desarrollará fuerza contra-electromotriz: $E' = 0$, y entonces es recorrido por la corriente I', tal que:

$$u = r\,I'.$$

Se puede evidenciar la existencia de la fuerza contra-electromotriz desarrollada por un motor, mediante el siguiente experimento:

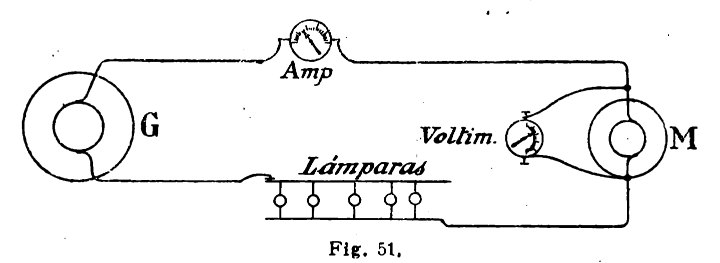


Fig. 51.

Se pone en movimiento un motor M por la corriente de un generador G (fig. 51); en los conductores que unen el generador con el motor se intercala un amperímetro y varias lámparas, y entre los bornes del motor un voltímetro.

Sea E la fuerza electromotriz del generador, R la resistencia del sistema formado por las lámparas, la línea y el generador, r la resistencia del motor.

Impidiendo la rotación del motor, el amperímetro indicará una corriente I cuyo valor es:

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

Las lámparas arderán con cierto brillo y el voltímetro indicará solamente la caída de tensión en el motor, es decir, rI.

Si dejamos girar el motor, desarrollará una fuerza contra-electromotriz E' y la corriente será I', que tendrá por valor:

$$I' = \frac{E - E'}{R + r}.$$

Por consiguiente, I' es inferior a I, la indicación del amperímetro baja y el brillo de las lámparas disminuye; en cambio, el voltímetro indicará $E' + rI$, muy superior a rI.

Los receptores químicos están formados por dos electrodos A y B (fig. 52) sumergidos en una solución salina; en ellos se desarrolla también una fuerza contra-electromotriz.

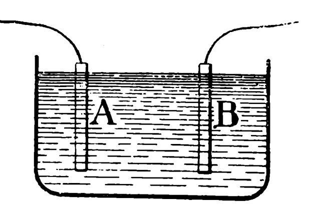


Fig. 52.

La experiencia enseña, en efecto, que si se quiere que una corriente atraviese estos receptores, es preciso aplicar entre los dos electrodos una diferencia de potencial superior a un cierto valor, que es la fuerza contra-electromotriz desarrollada por el receptor.

Por ejemplo, para descomponer el agua por el paso de la corriente es necesario aplicar entre los dos electrodos una diferencia de potencial por lo menos igual a 1,48 volts, independientemente de la tensión necesaria para vencer la resistencia del agua.

Si E' es el valor de la fuerza contra-electromotriz y u la diferencia de potencial aplicada entre los

conductores, la corriente en el receptor cuya resistencia es R, será:

$$I = \frac{u - E'}{R}.$$

Los receptores térmicos son las lámparas de incandescencia y los aparatos de calefacción, y no desarrollan fuerza contra-electromotriz; por lo tanto, la corriente que los recorre tiene por valor:

$$I = \frac{u}{R}.$$

Rendimiento. — Sea u la diferencia de potencial aplicada entre los bornes de un motor, I la corriente en este motor, r su resistencia interior y E' la fuerza contra-electromotriz desarrollada; hemos visto que:

$$u = E' + r\,I.$$

Multiplicando los dos miembros de esta igualdad por I, se tiene:

$$u\,I = E'\,I + r\,I^2.$$

Sabemos que $u\,I$ es la potencia comunicada al motor, $r\,I^2$ la potencia perdida bajo forma de calor por efecto Joule en el interior, de modo que $E'\,I$ mide la potencia transformada por el motor bajo forma de potencia utilizable, esto es:

$$\underset{\text{potencia utilizable}}{E'\,I} = \underset{\text{potencia suministrada}}{u\,I} - \underset{\text{potencia perdida por efecto Joule}}{r\,I^2}$$

Por definición, el rendimiento eléctrico del motor es:

$$\rho = \frac{E'\,I}{u\,I} = \frac{E'}{u},$$

o también, por ser $E' = u - r\,I$:

$$\rho = \frac{u - r\,I}{u}.$$

En realidad, y análogamente a lo que sucede en el generador, hay otras pérdidas de potencia además de las pérdidas por efecto Joule, y el rendimiento verdadero resulta inferior al rendimiento eléctrico.

Leyes de Kirchhoff

Estas leyes permiten determinar la magnitud y el sentido de las corrientes en varios conductores unidos entre sí, formando un sistema complejo en que existen fuerzas electromotrices.

1.ª *Ley de las corrientes concurrentes.*—Esta ley establece una relación entre las corrientes que recorren varios conductores que tienen un punto común.

La suma de las intensidades de la corriente que se dirigen a un punto común a varios conductores es igual a la suma de las intensidades de las corrientes que se alejan del mismo punto.

En la figura 53 se tiene:

$$I_1 + I_2 + I_4 = I_3 + I_5 .$$

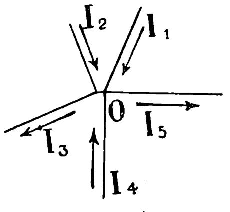


Fig. 53.

2.ª *Ley de los contornos cerrados.*— Esta ley establece una relación entre las corrientes y las fuerzas electromotrices que existen en un contorno cerrado.

Sea un contorno cerrado $A\,B\,C\,D\,E$ (fig. 54); tomemos sobre el circuito un sentido cualquiera como positivo, por ejemplo el de la flecha F. Una fuerza electromotriz estará afectada del signo + cuando *tienda* a producir una corriente en el sentido positivo F y del signo — cuando la corriente que tienda a producir sea de sentido contrario. Una corriente irá afectada del signo + o del signo — según tenga el sentido tomado como positivo o el contrario. (La corriente que *tiende*

a producir un generador o un receptor está dirigida de su polo + hacia su polo — en el circuito exterior.)

En estas condiciones: *la suma algebraica de las fuerzas electromotrices es igual a la suma algebraica de los productos de la resistencia de cada parte en qué se puede descomponer el circuito por la corriente que lo recorre,* lo cual se puede expresar por la igualdad:

$$\Sigma E = \Sigma R I \text{ (1)}.$$

En el ejemplo de la figura 54 se tiene:

$$E_3 - E_1 - E_2 = - R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4 - R_5 I_5.$$

Para aplicar estas leyes se opera del modo siguiente: Se empieza por indicar con flechas de direcciones cualesquiera los sentidos de las corrientes en las distintas ramas de la red y se representan por i_1, i_2, i_3 las intensidades de las corrientes. Hecho esto se escribe para cada uno de los vértices de la red, que la suma de las corrientes que se dirigen hacia él es igual a la suma de las corrientes que de él parten.

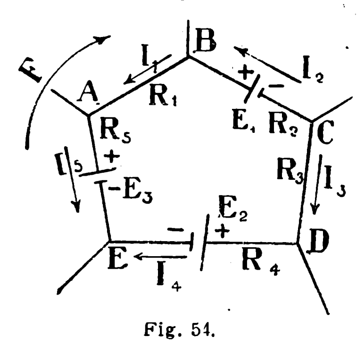


Fig. 54.

Se sigue cada contorno cerrado en un sentido cualquiera tomado como sentido positivo, y se escribe para cada uno de ellos, determinando los signos de las fuerzas electromotrices y de las corrientes como hemos indicado, la igualdad:

$$\Sigma E = \Sigma R I.$$

(1) El signo Σ significa «suma de términos análogos».

Así se obtienen, con la restricción que haremos a continuación, tantas ecuaciones como corrientes hay que calcular, deduciendo de estas ecuaciones el valor de las intensidades.

Si se obtiene para una corriente un valor negativo, quiere decir que su sentido es inverso del que indica la flecha.

Hay que tener en cuenta que un contorno tal como $A\,B\,C\,D$ puede comprender otros dos contornos $ABCE$ y $AECD$ (figura 55); en este caso, la segunda ley aplicada a estos tres contornos dará tres ecuaciones; pero estas ecuaciones no son distintas; se reducen a dos solamente. En este caso se escribirán dos ecuaciones aplicando la ley de los contornos cerrados a los dos contornos envueltos, o al contorno envolvente y a uno de los envueltos.

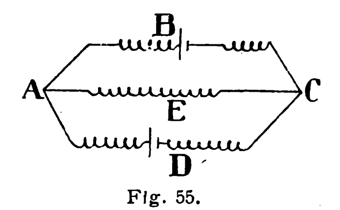


Fig. 55.

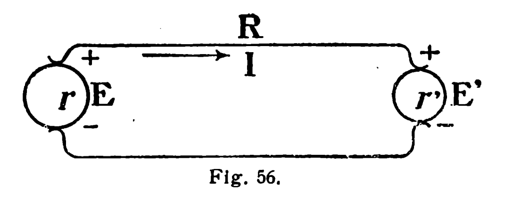


Fig. 56.

Ejemplos. — 1.° Sea un circuito en el que hay un generador de fuerza electromotriz E y de resistencia interior r, un conductor de resistencia R y un receptor de fuerza contra-electromotriz E' y de resistencia r' (fig. 56).

Sea I la corriente en el circuito; aplicando a este circuito la ley de los contornos cerrados, se tiene:

$$E - E' = (R + r + r')\,I,$$

de donde:

$$I = \frac{E - E'}{R + r + r'}.$$

2.° Determinar las corrientes en los conductores que componen el circuito (fig. 57). Representemos por i_1, i_2, i_3 los valores de las corrientes en las tres ramas de la red considerada, y sean f_1, f_2, f_3 los sentidos tomados arbitrariamente para estas corrientes. La primera ley de Kirchhoff aplicada al vértice A da:

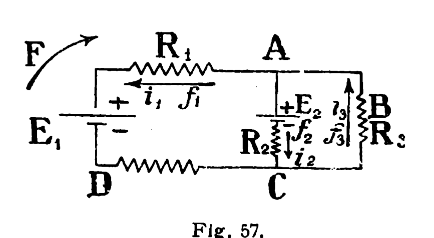


Fig. 57.

(1) $$i_1 + i_2 = i_3.$$

Sea F el sentido positivo tomado para los contornos: se tiene, aplicando la segunda ley:

(2) Contorno DAC. . . . $E_1 - E_2 = - R_1 i_1 + R_2 i_2$

(3) Contorno $DABC$. . . $E_1 = - R_1 i_1 - R_3 i_3$.

Las tres ecuaciones (1), (2) y (3) dan los valores de i_1, i_2, i_3.

Si se hubiera tomado el segundo contorno envuelto $A\,B\,C$, se habría obtenido

$$E_2 = - R_2 I_2 - R_3 I_3,$$

y se ve que esta ecuación es una consecuencia de las ecuaciones (2) y (3), pues bastaría restar estas dos, miembro a miembro, para obtener aquélla.

CAPÍTULO VII

Pilas y acumuladores

Pilas

Las pilas son generadores que transforman la energía química en eléctrica.

La pila más sencilla está formada por una lámina de cobre y otra de zinc sumergidas en agua acidulada. Este sistema constituye un generador, pues se comprueba que entre las dos láminas hay una diferencia de potencial, estando el cobre a un potencial más elevado que el zinc. Si se unen el cobre y el zinc a los extremos de un circuito exterior, pasará por este circuito una corriente que va del cobre al zinc y por la pila circulará una corriente en el interior que va del zinc al cobre. Según la definición que dimos de polos de un generador, el cobre es el polo positivo o electrodo positivo, y el zinc el polo negativo o electrodo negativo de la pila (fig. 58).

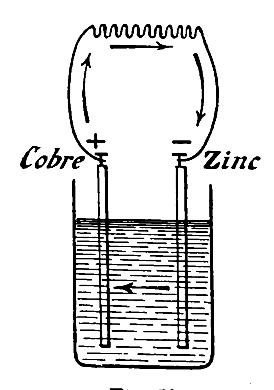


Fig. 58.

Mientras la pila produce una corriente, se puede observar que el zinc se disuelve poco a poco en el agua

acidulada, lo cual se expresa diciendo que es atacado por el ácido, formándose sulfato de zinc si el agua está acidulada con ácido sulfúrico. La energía química del sistema zinc-ácido sulfúrico se transforma en energía eléctrica del mismo modo que anteriormente vimos que la energía del sistema carbón-oxígeno se transformaba en energía térmica durante la combustión.

Polarización. — Si se deja una pila así formada produciendo una corriente en el circuito exterior durante cierto tiempo, se observa que esta corriente disminuye progresivamente de intensidad y que al mismo tiempo un voltímetro colocado entre los dos polos de la pila indica una diferencia de potencial decreciente; si se corta el circuito, se observa también que la fuerza electromotriz, inmediatamente después de la ruptura es menor que antes.

La causa de la disminución de la corriente y de la fuerza electromotriz es debida al fenómeno de polarización.

Para formarse una idea clara de este fenómeno, haremos las siguientes observaciones:

1.ª Si se ponen en comunicación dos láminas metálicas, de cobre, por ejemplo, sumergidas en ácido sulfúrico, con los dos bornes de un generador de corriente, se observa que el agua se descompone en *hidrógeno* que va a la lámina unida al polo —, y en oxígeno que va a la lámina unida al polo + del generador. Es decir, que todo sucede como si el hidrógeno marchara en sentido de la corriente y el oxígeno en sentido contrario (fig. 59).

2.ª Si después de pasar la corriente durante un cierto tiempo en las condiciones antedichas, se suprime el generador y se unen las dos láminas de cobre a los bornes de un aparato que pueda indicar la exis-

tencia y el sentido de una corriente (galvanómetro), se comprueba que hay una corriente de sentido contrario al de la primera; esta corriente dura muy poco tiempo. Hagamos desprender las burbujas de oxígeno y obser-

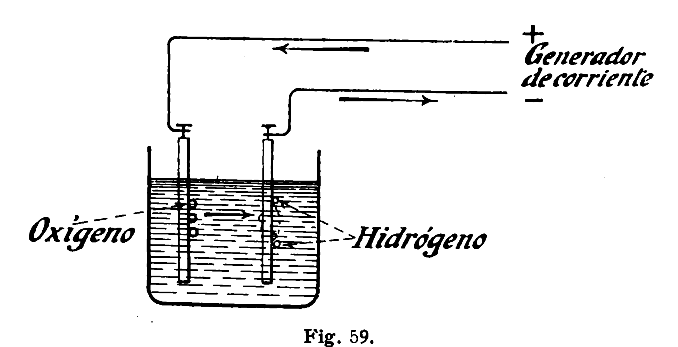


Fig. 59.

varemos que existe entre la lámina de cobre sobre la cual están aún adheridas las burbujas de hidrógeno, es decir, entre la lámina polarizada y la otra lámina, una fuerza electromotriz. El hidrógeno es susceptible por consiguiente de formar con un metal un elemento de pila, en que él constituye el electrodo negativo (fig. 60).

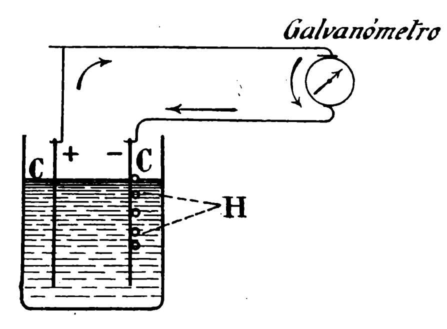


Fig. 60.

Consideremos ahora la pila primitiva formada por la serie de conductores cobre-agua acidulada-zinc, produciendo una corriente I en un circuito exterior, del cobre hacia el zinc (fig. 61). Esta corriente circula en el interior de la pila, esto es, por el agua acidulada, del zinc al cobre; el agua se

descompone en hidrógeno que marcha en el sentido de la corriente y se fija sobre el cobre, y en oxígeno que marcha en sentido contrario adhiriéndose al zinc, con el cual se combina en presencia del ácido sulfúrico formando sulfato de zinc que se disuelve. Ahora bien, el hidrógeno adherido al cobre constituye con el zinc un elemento de pila en que el hidrógeno es el polo — y el zinc el polo +, esto es, que se produce una fuerza electromotriz inversa a la del elemento cobre-zinc; de aquí la disminución observada (fig. 61).

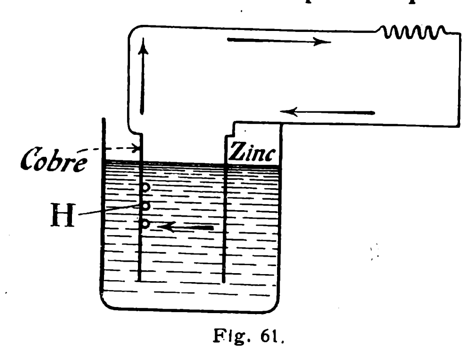


Fig. 61.

Además, el hidrógeno forma una capa gaseosa que envuelve al cobre y aumenta la resistencia interior de la pila, aumentando también esta resistencia por la formación de sulfato de zinc menos conductor que el agua acidulada. Si E es la fuerza electromotriz de la pila antes de circular la corriente, E' la fuerza electromotriz inversa, debida a la polarización, R la resistencia exterior, r la resistencia interior antes de la polarización y r' la resistencia interior después de la polarización, la corriente es:

Al principio:

$$I = \frac{E}{R + r};$$

y después del paso de la corriente:

$$I' = \frac{E - E'}{R + r'}.$$

Despolarización.—Se disminuye el efecto de la polarización impidiendo que el hidrógeno proveniente de la descomposición del agua acidulada se fije sobre el electrodo positivo. Para conseguirlo se recubre este electrodo de una sustancia capaz de actuar químicamente sobre el hidrógeno. Esta sustancia se llama *despolarizante*. Los despolarizantes son en general oxidantes, es decir, compuestos oxigenados que ceden fácilmente su oxígeno que se combina con el hidrógeno para formar agua. El despolarizante está generalmente separado del líquido excitador, es decir, del líquido en el cual está sumergido el electrodo negativo que es atacado, por un vaso poroso (fig. 62).

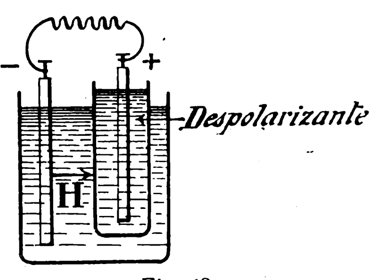


Fig. 62.

Constitución general de una pila.—De lo que acabamos de decir se deduce que una pila está constituída por los elementos siguientes:

1.° Un *líquido excitador;* los principales líquidos excitadores empleados son: el agua acidulada con ácido sulfúrico o clorhídrico, las soluciones de sal amoníaco (clorhidrato de amonio), de cloruro de sodio, de potasa, de sosa, ...

2.° Un *electrodo negativo* atacado por el líquido excitador.

Se emplea casi exclusivamente el zinc. El zinc ordinario tiene el gran inconveniente de ser disuelto por el líquido excitador en circuito abierto, cuando la pila no produce corriente ninguna, esto es, cuando no se utiliza la pila.

Se evita este inconveniente *amalgamando* la lámina de zinc; la amalgama se hace poniendo el zinc previamente desoxidado en contacto con mercurio sobre el que hay agua acidulada con ácido sulfúrico. Se frota el zinc con un trapo y se lava con mucha agua. También puede hacerse la amalgama sumergiendo la lámina de zinc en una solución de nitrato mercúrico y añadiendo ácido clorhídrico.

3.º Un *electrodo positivo* formado por un cuerpo no atacado por el líquido excitador: cobre, carbón, hierro, mercurio, ...

4.º Un *despolarizante;* los principales despolarizantes son: el sulfato de cobre, el bióxido de manganeso, el ácido nítrico, el ácido crómico, el sulfato de mercurio, ...

Constantes de una pila.— Las propiedades de una pila desde el punto de vista de la potencia y de la energía utilizables que puede proporcionar están caracterizadas por los valores de las magnitudes siguientes: fuerza electromotriz, resistencia interior, régimen, capacidad. Estas magnitudes son sensiblemente independientes de las condiciones en que funciona la pila, por cuyo motivo reciben el nombre de *constantes de la pila.*

1.º *Fuerza electromotriz.*—Es igual, según sabemos, a la diferencia de potencial entre los electrodos en circuito abierto, y depende únicamente de la naturaleza de los elementos que forman la pila y por lo tanto es independiente de las dimensiones de la misma; sin embargo, puede disminuir por efecto de la polarización si la corriente es exagerada y varía un poco con la concentración de los líquidos y con su temperatura.

2.º *Resistencia interior.*— La resistencia interior

de una pila depende esencialmente de sus dimensiones y es tanto mayor cuanto más pequeñas son estas dimensiones; varía con el grado de concentración de los líquidos y disminuye cuando sube la temperatura.

Los vasos porosos destinados a separar el despolarizante del líquido excitador dan a la resistencia interior un valor muy elevado, por lo cual se suprimen en un gran número de pilas. Para esto, cuando el despolarizante es sólido se mantiene alrededor del electrodo positivo por medio de una bolsa de tela que se impregna completamente del líquido excitador, o bien se sujeta en forma de conglomerados al electrodo positivo por medio de ligas. Cuando el despolarizante es líquido, se da a la pila una forma tal, que el líquido excitador y el despolarizante estén a niveles diferentes, manteniéndose separados por efecto de su distinta densidad.

3.° *Régimen.*—Es la corriente máxima que puede producir la pila sin polarizarse; más allá de este valor la producción de hidrógeno es tan rápida, que el despolarizante no puede impedir que se fije sobre el electrodo positivo, y la fuerza electromotriz baja. El régimen depende de la naturaleza de las sustancias que forman la pila y de sus dimensiones; para un mismo tipo de pila es tanto mayor cuanto mayores son las dimensiones.

4.° *Capacidad.* — Es la cantidad de electricidad que puede producir una pila desde que se construye hasta que se consume, y depende de la naturaleza de las sustancias que forman la pila y de sus dimensiones.

Corriente producida por una pila. — Sea una pila de fuerza electromotriz E volts, de resistencia inte-

rior r y cerrada sobre un circuito exterior de resistencia R; se sabe que la corriente es:

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

Diferencia de potencial en los bornes. — Cuando una pila produce la corriente I, la diferencia de potencial entre sus electrodos es:

$$e = E - rI \quad \text{o bien} \quad e = RI.$$

Potencia.—Sea i la corriente producida por la pila; sabemos que la diferencia de potencial entre sus bornes es: $e = E - ri$. La potencia utilizada en el circuito exterior es por consiguiente ei:

$$(E - ri)\,i.$$

Potencia utilizable. — Se llama potencia utilizable a la potencia máxima que puede producir la pila en un circuito exterior. Hallemos, pues, las condiciones a que debe satisfacer el producto $(E - ri)\,i$ para ser máximo.

Este producto puede escribirse:

$$\frac{(E - ri) \times ri}{r},$$

y como r es constante, esta expresión será un máximo cuando lo sea $(E - ri) \times ri$. Ahora bien, se sabe que un producto de dos factores cuya suma es constante es máximo cuando los dos factores son iguales; la suma de los dos factores $E - ri$ y ri es: $E - ri + ri = E$, que es constante, luego la potencia es máxima cuando

$$E - ri = ri, \quad \text{o sea,} \quad E = 2ri, \quad i = \frac{E}{2r}.$$

Si R es la resistencia del circuito exterior en el cual la corriente es i, se tiene:

$$i = \frac{E}{R + r};$$

luego

$$\frac{E}{2r} = \frac{E}{R + r}, \qquad \text{de donde:} \quad 2r = R + r \quad \text{y} \quad R = r.$$

La corriente es máxima cuando la resistencia exterior es igual a la resistencia interior.

Por lo tanto, si la pila puede producir la corriente $i = \frac{E}{2r}$, es decir, si esta corriente no es superior al régimen, la potencia utilizable es:

$$(E - ri)\,i, \quad \text{o sea} \quad \left(E - r\frac{E}{2r}\right)\frac{E}{2r}, \quad \text{esto es,} \quad \frac{E^2}{4r}.$$

Si $i = \frac{E}{2r}$ es superior al régimen I, la potencia utilizable es:

$$(E - rI)\,I.$$

Rendimiento. — Según la definición que hemos dado anteriormente, el rendimiento es:

$$\frac{E - ri}{E}.$$

En el caso en que la corriente $i = \frac{E}{2r}$ sea inferior al régimen, el rendimiento es:

$$\frac{E - r\frac{E}{2r}}{E} = \frac{E - \frac{E}{2}}{E} = \frac{\frac{E}{2}}{E} = \frac{1}{2};$$

este rendimiento es, pues, el 50 por 100.

Si $\frac{E}{2r}$ es superior al régimen I, el rendimiento es:

$$\frac{E - rI}{E}.$$

Diferentes tipos de pilas.—Existen muchos tipos de pilas, pero sólo describiremos los más usuales, indicando sus modificaciones más notables.

Los principales tipos son:

Tipo Daniell (modificaciones: Meidinger y Callaud) (figuras 63, 64 y 65);

Tipo Leclanché (modificaciones: pila con aglomerados, pila con saco) (fig. 66);

Tipo Bunsen (fig. 67);

Tipo Lalande (figs. 68, 69 y 70);

Tipo Poggendorff (fig. 71).

TIPO DANIELL, E = 1,07 volts

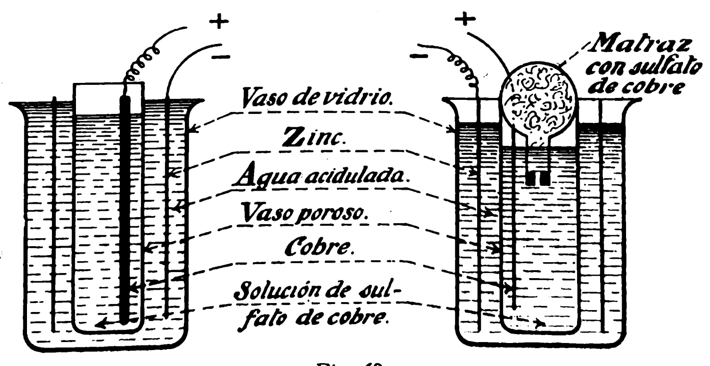


Fig. 63.

Líquido excitador: sol. de sulfato de zinc.
Electrodo negativo: zinc.

Electrodo positivo: cobre.
Despolarizante: sulfato de cobre.

MODIFICACIONES DE LA PILA DANIELL

Pila Meidinger:

Los cristales de sulfato de cobre contenidos en el vaso cónico tienen por objeto conservar concentrada la solución de sulfato de cobre.

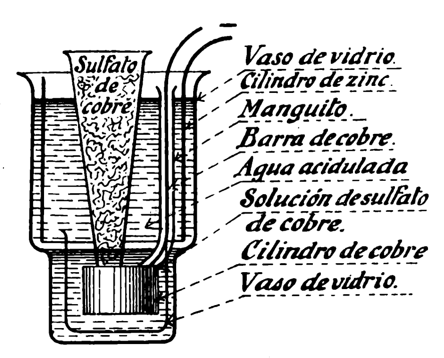


Fig. 64.

Pila Callaud:

La solución de sulfato de cobre está separada del agua acidulada, por su mayor densidad, no habiendo el vaso inferior de vidrio de la pila Meidinger.

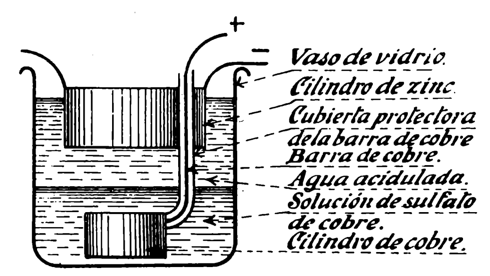


Fig. 65.

TIPO LECLANCHE, E = 1,4 volts

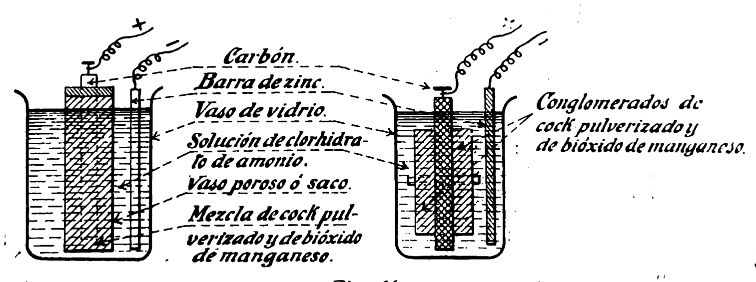


Fig. 66.

Líquido excitador: sol. de sal amoníaco (clorhidrato amónico).
Electrodo negativo: zinc.

Electrodo positivo: carbón de retorta.
Despolarizante: bióxido de manganeso.

TIPO BUNSEN, E = 1,8 volts

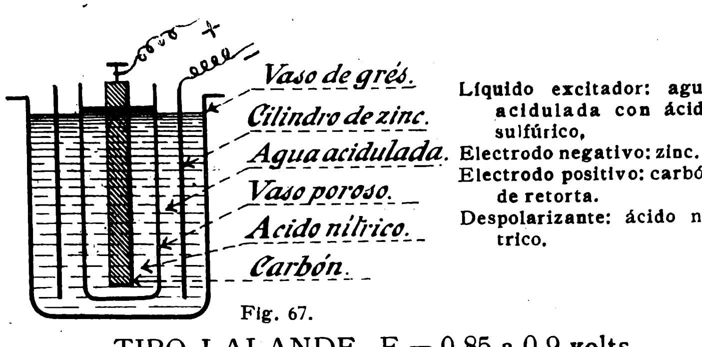
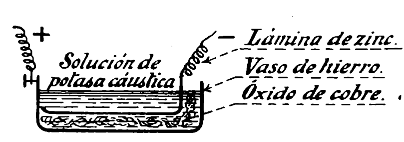


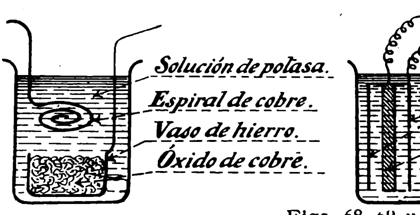
Fig. 67.

Líquido excitador: agua acidulada con ácido sulfúrico.
Electrodo negativo: zinc.
Electrodo positivo: carbón de retorta.
Despolarizante: ácido nítrico.

TIPO LALANDE, E = 0,85 a 0,9 volts



Líquido excitador: solución de potasa cáustica al 30 ó 40 %.
Electrodo negativo: zinc. Electrodo positivo: cobre o hierro.
Despolarizante: óxido de cobre.



Figs. 68, 69 y 70.

TIPO POGGENDORFF, E = 2 volts

Líquido excitador: agua acidulada con ácido sulfúrico.
Electrodo negativo: zinc.
Electrodo positivo: carbón.
Despolarizante: ácido crómico.

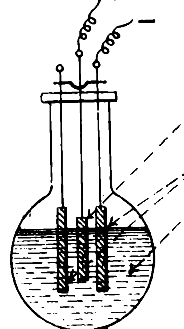


Fig. 71.

Precio de la energía producida por las pilas.— Empleo de las pilas. — Las pilas son generadores muy cómodos para ciertas aplicaciones especiales que sólo requieren una pequeña potencia; en efecto, están siempre dispuestas a producir esta potencia con sólo cerrar el circuito.

Pero el precio a que resulta esta energía es considerable, alcanzando a 3 ó 4 pesetas el kilowatt-hora, mientras que las centrales eléctricas la distribuyen por un precio nunca superior a una peseta el kilowatt-hora.

Supongamos que se quiere alimentar con pilas una lámpara de 10 bujías que absorbe 2 watts por bujía. Esta lámpara consumirá:

$$2 \times 10 = 20 \text{ watts};$$

a 3 pesetas el kilowatt-hora, el precio a que resulta este alumbrado por hora es:

$$3 \times 0{,}02 = 0{,}06 \text{ ptas.},$$

aproximadamente de 4 a 5 veces más que el mismo alumbrado por gas.

Cuando el trabajo que se necesita es intermitente y la duración en gasto continuo es muy pequeña, el tipo más conveniente es el tipo Leclanché, pues el desgaste es nulo en circuito abierto y su precio de coste y entretenimiento es muy reducido. Por estas causas éste es el tipo casi exclusivamente empleado para los timbres, telégrafo, teléfonos interiores, etc.

Cuando la pila ha de producir una corriente continua durante un cierto tiempo, se emplea el tipo Daniell si la corriente no es muy grande, 2 amperes como máximo, y el tipo Bunsen o Lalande si la corriente es más elevada, porque estas tres pilas conservan, aun

cuando están gastándose, fuerzas electromotrices casi constantes.

La pila Bunsen no debe emplearse más que al aire libre, o en locales muy ventilados, por ser perjudiciales los vapores nitrosos que se desprenden.

La pila de bicromato potásico, tipo Poggendorff, se emplea cuando se quiere obtener una corriente intensa, por ser bastante elevada su fuerza electromotriz y muy pequeña su resistencia interior. Pero su precio de coste y de entretenimiento es muy grande y el zinc se disuelve rápidamente aun en circuito abierto; por esto se ha provisto de un dispositivo que permite retirar rápidamente el zinc del líquido y sumergirlo en el momento en que haya necesidad de la corriente.

Estos inconvenientes limitan mucho su empleo.

Acoplamiento de las pilas. — La potencia que se requiere en un circuito que se ha de alimentar con pilas, es generalmente superior a la que puede proporcionar en estas condiciones una sola pila.

Entonces hay que emplear un grupo de varias pilas. En el estudio que a continuación hacemos de los distintos acoplamientos y de sus propiedades, daremos el nombre de *elemento* a cada una de las pilas que constituyen el grupo.

Estos elementos pueden ser acoplados en serie o tensión, en paralelo o cantidad y en agrupación mixta.

I. ACOPLAMIENTO EN SERIE O TENSIÓN. — Los elementos están dispuestos de tal modo que el polo negativo del primero está unido al polo positivo del segundo, el negativo del segundo al positivo del tercero y así sucesivamente (fig. 72).

Los dos polos extremos, el positivo del primero y el negativo del último, son los dos polos del grupo. Se

representa esquemáticamente un grupo así formado, como indica la figura 73.

Propiedades. — 1.ª La fuerza electromotriz del grupo es igual a la suma de las fuerzas electromotrices de todos los elementos.

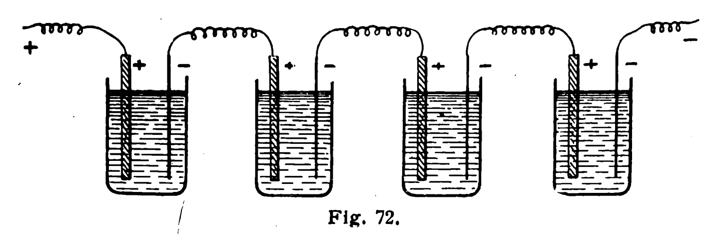


Fig. 72.

2.ª La resistencia interior del grupo es igual a la suma de las resistencias interiores de cada elemento.

3.ª Si todos los elementos tienen el mismo régimen, el régimen del grupo es igual al de un solo elemento; en caso contrario, es igual al régimen del elemento que tiene menor régimen. En efecto, todos los elementos producen la misma corriente, que es la que pasa por el circuito exterior. Se ve claramente que no es razonable agrupar elementos de régimen diferente. Supongamos, en efecto, que haya en el grupo uno o dos elementos A, B de régimen inferior al de los otros C, D, E (fig. 74).

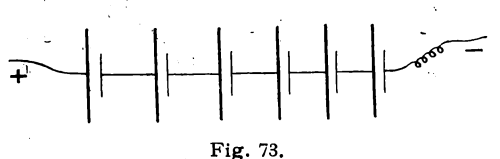


Fig. 73.

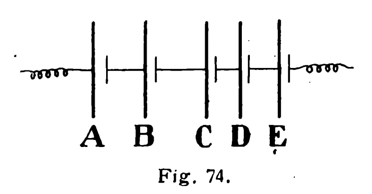


Fig. 74.

Pueden suceder dos cosas: o que se produzca una corriente no superior al régimen de A y B, y entonces los elementos C, D, E no serán utilizados por com-

pleto, resultando su precio demasiado caro, o bien la corriente será igual al régimen de C, D, E, y entonces los elementos A y B producirán una corriente demasiado intensa y se polarizarán.

4.ª Capacidad: todos los elementos producen la misma corriente, luego si son idénticos, cuando uno de ellos esté gastado lo estarán todos; de modo que la capacidad del grupo es igual a la de un solo elemento.

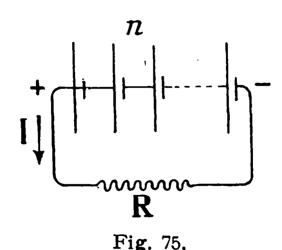


Fig. 75.

Corriente.—Supongamos que se tienen n elementos idénticos de fuerza electromotriz e volts, de resistencia interior r, y cerrados por un circuito exterior de resistencia R (fig. 75).

La fuerza electromotriz del grupo es: $E = ne$.

La resistencia interior es: $\rho = nr$.

La resistencia total es: $R + \rho = R + nr$.

La corriente producida es, por consiguiente:

$$I = \frac{E}{R+\rho} = \frac{n e}{R+n r}.$$

Diferencia de potencial en los bornes.— La caída de tensión en el interior del grupo es $\rho\, I$, o sea:

$$n r \times \frac{n e}{R+n r} = \frac{n^2 e r}{R+n r}.$$

La diferencia de potencial en los bornes tiene por valor:

$$u = E - \rho I$$

o sea:

$$u = n e - \frac{n^2 e r}{R+n r} = n \frac{e R}{R+n r}.$$

Se sabe que esta diferencia de potencial es también igual a RI, es decir:

$$R \times \frac{ne}{R+nr}.$$

Potencia. — La potencia utilizada en el circuito exterior tiene por valor uI, es decir, RI^2:

$$W = \frac{neR}{R+nr} \times \frac{ne}{R+nr} = \frac{n^2e^2R}{(R+nr)^2}.$$

II. Agrupación en paralelo o cantidad.—Los polos positivos de todos los elementos se unen a un mismo punto o a un mismo conductor, y de igual

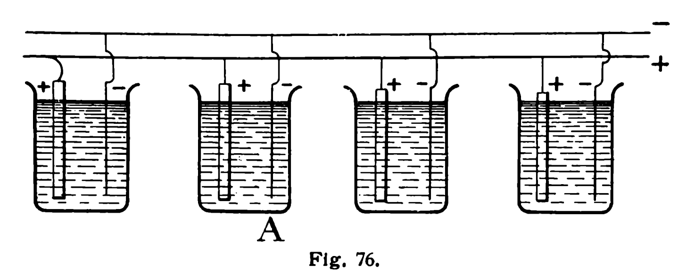


Fig. 76.

manera los polos negativos a un mismo punto o a un mismo conductor. Estos dos puntos o estos dos conductores constituyen los dos polos del grupo (fig. 76).

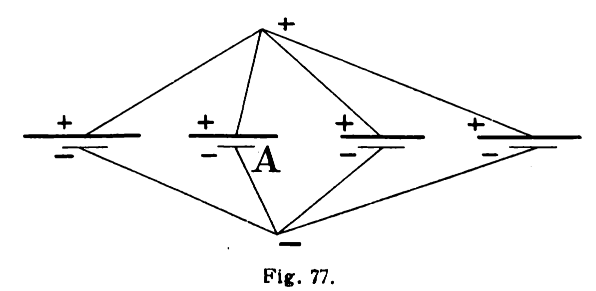


Fig. 77.

Este sistema de agrupación se representa esquemáticamente del modo indicado en la figura 77.

Propiedades.—Este acoplamiento no puede hacerse más que con elementos que tengan la misma fuerza electromotriz, porque si uno de ellos, *A* por ejemplo, tuviera una fuerza electromotriz inferior a la de los otros, se produciría sobre él una corriente local y la batería se gastaría con bastante rapidez.

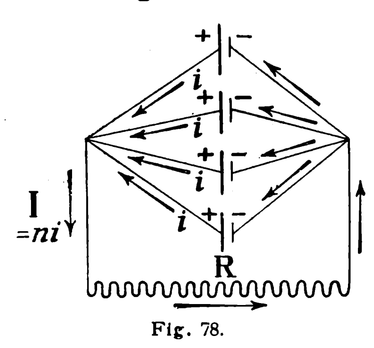


Fig. 78.

Supondremos, pues, que el grupo está constituído por elementos idénticos.

1.° La fuerza electromotriz del grupo es igual a la de un solo elemento.

2.° La resistencia interior del grupo es igual a la de un solo elemento dividida por el número de elementos.

3.° Las corrientes producidas por todos los elementos se suman en el circuito exterior, que queda así recorrido por una corriente cuyo valor es igual a la corriente que produce un elemento multiplicada por el número de elementos.

Por consiguiente, el régimen de la batería es igual al régimen de uno de los elementos multiplicado por el número de éstos.

4.° Análogamente, la capacidad es igual a la de uno de los elementos multiplicada por el número de elementos.

Corriente.—Sea n el número de elementos, e la fuerza electromotriz, r la resistencia interior de cada uno de ellos y R la resistencia del circuito exterior.

Fuerza electromotriz del grupo: $E = e$.

Resistencia interior: $\rho = \frac{r}{n}$.

Resistencia total: $R + \rho = R + \frac{r}{n}$.

La corriente que recorre el circuito exterior es, por lo tanto:

$$I = \frac{E}{R+\rho}, \quad \text{o bien} \quad I = \frac{e}{R+\frac{r}{n}},$$

que puede ponerse bajo esta forma:

$$I = \frac{n\,e}{n\,R+r}.$$

La corriente producida por cada elemento es:

$$i = \frac{I}{n}, \quad \text{o sea} \quad i = \frac{e}{n\,R+r}.$$

Diferencia de potencial en los bornes. — La caída de tensión en el interior es $\rho\,I$, o sea:

$$\frac{r}{n} \times \frac{n\,e}{n\,R+r}, \quad \text{o bien} \quad \frac{r\,e}{n\,R+r}.$$

La diferencia de potencial en los bornes es:

$$u = E - \rho\,I$$

$$u = e - \frac{r\,e}{n\,R+r} = \frac{n\,R\,e}{n\,R+r}.$$

Es evidente que también es igual a $R\,I$, es decir:

$$R \times \frac{n\,e}{n\,R+r}.$$

Potencia. — La potencia utilizada en el circuito exterior tiene por valor $u\,I$ o $R\,I^2$, es decir:

$$\frac{n\,R\,e}{n\,R+r} \times \frac{n\,e}{n\,R+r} = \frac{n^2\,R\,e^2}{(n\,R+r)^2}.$$

Elección del acoplamiento. — Comparando las expresiones que dan los valores de la corriente y de la potencia:

$$\begin{cases} I = \dfrac{n\,e}{R+n\,r}, & W = \dfrac{n^2 e^2 R}{(R+n\,r)^2} \ldots \text{agrupación en serie,} \\ I = \dfrac{n\,e}{n\,R+r}, & W = \dfrac{n^2 e^2 R}{(n\,R+r)^2} \ldots \text{agrupación en cantidad,} \end{cases}$$

se ve que si la resistencia R es superior a la resistencia interior r, se debe emplear el acoplamiento en serie, y que al contrario, es ventajoso emplear el acoplamiento en cantidad si la resistencia exterior es bastante menor que la resistencia interior.

III. Acoplamiento mixto. — A veces es imposible satisfacer a las condiciones necesarias de tensión e intensidad por medio de uno solo de los modos anteriores de agrupación; en este caso se recurre al acoplamiento mixto, que consiste en acoplar en paralelo grupos idénticos de elementos acoplados en serie.

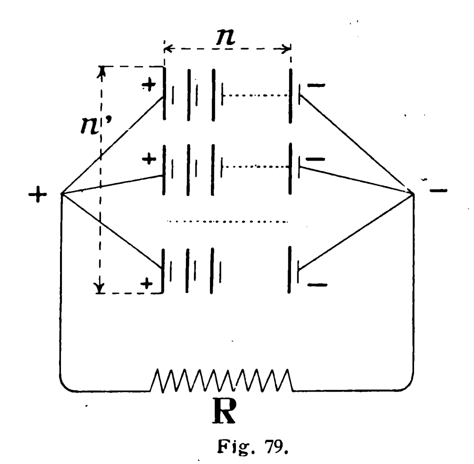


Fig. 79.

El número de elementos en serie está determinado por el valor de la tensión que se quiere obtener en los bornes del circuito de utilización, y el número en paralelo de grupos así formados estará determinado por la intensidad de la corriente que ha de recorrer el circuito.

Propiedades.—Supondremos que todos los elementos son idénticos:

1.° La fuerza electromotriz de la batería es igual a la de uno de los grupos de elementos en serie.

2.° La resistencia interior de la batería es igual a la de uno de los grupos dividida por el número de grupos.

3.° El régimen y la capacidad son iguales respectivamente al régimen y a la capacidad de uno de los elementos multiplicados por el número de grupos.

Corriente.—Sea n el número de elementos en serie por grupo, y n' el número de estos grupos acoplados en paralelo (fig. 79).

La fuerza electromotriz de un grupo y por consiguiente la de la batería es: $E = n\,e$.

La resistencia de un grupo es: $n\,r$.

La de la batería es: $\rho = \frac{n\,r}{n'}$.

Luego la corriente es:

$$I = \frac{E}{R + \rho},$$

o sea:

$$I = \frac{n\,e}{R + \frac{nr}{n'}} = \frac{n\,n'\,e}{n'\,R + nr}.$$

Si N es el número total de elementos que componen la batería, se tiene:

$$N = n\,n'$$

e

$$I = \frac{N\,e}{n'\,R + n\,r}.$$

Diferencia de potencial en los bornes.— La caída de tensión en el interior es:

$$\rho\,I = \frac{nr}{n'} \times \frac{n\,n'\,e}{n'\,R + n\,r} = \frac{n^2 e r}{n'\,R + n\,r},$$

y la diferencia de potencial es:

$$u = E - \rho I = n e - \frac{n^2 e r}{n' R + n r},$$

o sea:

$$u = \frac{n n' e R}{n' R + n r} = \frac{N e R}{n' R + n r},$$

Potencia. — La potencia utilizada en el circuito exterior es:

$$W = u I = \frac{N e R}{n' R + n r} \times \frac{N e}{n' R + n r},$$

o bien:

$$W = \frac{N^2 e^2 R}{(n' R + n r)^2}.$$

EJEMPLO. — Se quiere alimentar por medio de pilas 4 lámparas en paralelo de 10 bujías, que consumen 2,5 watts por bujía funcionando bajo 8 volts.

Elección de las pilas.—Teniendo que funcionar las lámparas durante un cierto tiempo, emplearemos pilas caracterizadas sobre todo por la constancia de su fuerza electromotriz, es decir, pilas Lalande, por ejemplo, en que las láminas de óxido de cobre de cada elemento tienen de dimensiones: 15 cm. × 15 cm. Uno de estos elementos tiene una resistencia interior de 1,015 ohms y su régimen es de 6 amperes.

Número de elementos. — La potencia necesaria para una lámpara es:

$$2{,}5 \times 10 = 25 \text{ watts},$$

y para las 4 lámparas:

$$25 \times 4 = 100 \text{ watts}.$$

Teniendo que ser la d. d. p. en los bornes de las lámparas, de 8 volts, la corriente total será:

$$I = \frac{100}{8} = 12{,}5 \text{ amperes.}$$

Siendo el régimen de 6 amperes, habrá que acoplar en paralelo dos grupos de elementos.

La diferencia de potencial ha de ser de 8 volts; sea x el número de elementos en serie por grupo, y siendo la fuerza electromotriz de estos elementos de 0,8 volts, la de la batería será $x \times 0{,}8$. La resistencia interior es:

$$\rho = \frac{x \times 0{,}015}{2}$$

y la caída de tensión:

$$\rho I = \frac{x \times 0{,}015}{2} \times 12{,}5.$$

Luego se debe verificar la siguiente igualdad:

$$x \times 0{,}8 - \frac{x \times 0{,}015}{2} \times 12{,}5 = 8,$$

o sea:

$$x\,(1{,}6 - 12{,}5 \times 0{,}015) = 16,$$

de donde:

$$x = \frac{16}{1{,}4} = 12.$$

La batería ha de componerse por consiguiente de dos grupos en paralelo de 12 elementos en serie cada uno, o sea de 24 elementos en total.

Comprobemos los resultados.

La corriente necesaria para el funcionamiento de una lámpara es:

$$i = \frac{25}{8}.$$

La resistencia r de una lámpara ha de ser tal, que se verifique la igualdad siguiente:

$$ri = 8,$$

o bien:

$$r \times \frac{25}{8} = 8,$$

de donde:

$$r = \frac{8 \times 8}{25} = \frac{64}{25}.$$

Luego la resistencia de las 4 lámparas montadas en paralelo, es decir, la resistencia del circuito exterior, es:

$$R = \frac{1}{4} \times \frac{64}{25} = \frac{64}{100} = 0{,}64 \text{ ohm}.$$

La corriente total en estas lámparas es por consiguiente:

$$I = \frac{24 \times 0{,}8}{2 \times 0{,}64 + 12 \times 0{,}015} = 11{,}7 \text{ amperes};$$

que es inferior a la corriente requerida por las lámparas, que es de 12,5 amperes; luego tendremos que tomar 13 elementos por grupo, lo cual dará una corriente I, que será:

$$I = \frac{26 \times 0{,}8}{2 \times 0{,}64 + 13 \times 0{,}015} = \frac{10{,}4}{0{,}83} = 12{,}5 \text{ amperes}.$$

La batería se compondrá, pues, de 2 grupos en paralelo de 13 elementos cada uno, o sea de 26 elementos.

Acumuladores

Un acumulador es un aparato en que la energía eléctrica proporcionada por un generador se trans-

forma en energía química en estado potencial, de tal modo que ésta puede transformarse directamente en energía eléctrica.

En este aparato la energía está como almacenada o acumulada para poderse utilizar al cabo de un cierto tiempo: de aquí el nombre de acumulador con que se le designa.

La composición y las propiedades de los acumuladores resultan de los hechos siguientes:

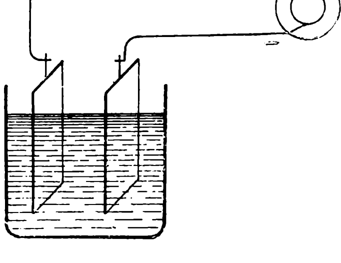


Fig. 80.

Supongamos dos láminas de plomo sumergidas en agua acidulada; estas láminas, bajo la influencia del oxígeno del aire, se recubren de una capa de óxido de plomo.

Si se unen a los dos polos de un generador, se sabe que el oxígeno proveniente de la descomposición del agua por el paso de la corriente se fija sobre la lámina unida al polo + del generador peroxidándolo, y que el hidrógeno se fija sobre la lámina unida al polo — y reduce su óxido.

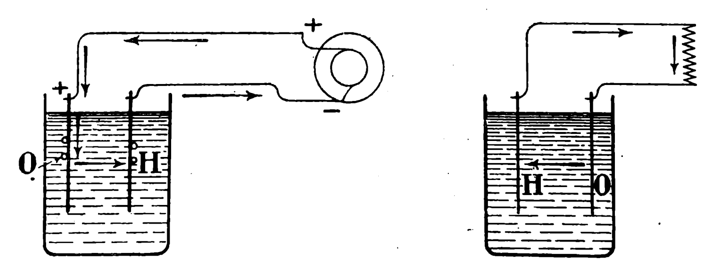
Por consiguiente vemos que bajo la influencia de la energía eléctrica se produce una modificación química en las dos láminas.

Después de haber pasado la corriente durante cierto tiempo, suprimamos el generador y unamos las dos láminas por un conductor; si la transformación inversa de la que ha producido la corriente puede efectuarse (y la experiencia nos dice que se efectúa), aparecerá en el conductor la energía proporcionada por el generador. Se comprueba, efectivamente, que el conductor es recorrido por una corriente de sentido con-

trario al de la primera; de modo que el agua sigue descompuesta, pero el oxígeno se fija sobre la lámina que había sido reducida por el hidrógeno y el óxido, mientras que el hidrógeno se fija sobre la que había sido oxidada y la reduce. Así, pues, al cabo de un cierto tiempo, las láminas vuelven a su estado primitivo, son idénticas y cesa la corriente.

La primera operación, que consiste en proporcionar al aparato la energía eléctrica que absorbe y transforma en energía química, es la *carga* del acumulador; la operación que consiste en utilizar esta energía bajo forma eléctrica, es la *descarga* del acumulador.

Reacciones químicas durante la carga y la descarga. —Antes de pasar la corriente, las láminas de plomo están recubiertas de una ligera capa de óxido de plomo; durante la carga (fig. 81) el oxígeno se fija como ya sabemos sobre la lámina positiva, es decir, sobre la



Figs. 81 y 82.

que está unida al polo + del generador; de modo que el óxido de plomo se transforma en *peróxido* ($Pb\,O^2$), de color oscuro, llamado también óxido pardo; el hidrógeno se fija sobre la lámina negativa y se apodera del oxígeno del óxido, que se reduce a plomo metálico.

Este plomo se encuentra en un estado especial, muy dividido y por consiguiente muy poroso, por lo cual se le llama plomo *esponjoso*.

Cuando todo el óxido que recubre las placas se ha transformado en peróxido de plomo por una parte, y en plomo esponjoso por otra, el oxígeno y el hidrógeno no ejercen acción alguna sobre las láminas; se desprenden del agua acidulada y la energía suministrada por el generador no tiene más efecto que el de descomponer el agua; la carga está terminada.

Durante la descarga (fig. 82) la corriente es de sentido inverso al de la corriente de carga, el oxígeno se fija sobre la lámina negativa y transforma el plomo esponjoso en óxido de plomo; el hidrógeno se fija sobre la lámina positiva y la reduce a óxido de plomo.

Estas transformaciones se ven con toda claridad en el cuadro siguiente:

	Lámina positiva	Lámina negativa
Antes de la carga. . . .	PbO	PbO
Durante la carga. . . .	$PbO+\underline{O}=\underline{PbO^2}$	$PbO+\underline{2H}=\underline{Pb}+H^2O$
Después de la carga. . . .	PbO^2 (peróxido)	Pb (plomo esponjoso)
Durante la descarga. .	$PbO^2+\underline{2H}=PbO+H^2O$	$Pb+\underline{O}=PbO$
Después de la descarga. .	PbO	PbO

Según lo expuesto, las placas de un acumulador pueden considerarse como formadas por un soporte de plomo recubierto de peróxido de plomo para la positiva y de plomo esponjoso para la negativa. Estos cuerpos constituyen la «materia activa» de las placas.

Acumulador Planté.—Gastón Planté ha estudiado estos fenómenos con diferentes metales, y ha compro-

bado que el plomo es metal que absorbe la mayor cantidad de energía para restituirla después en la forma que hemos indicado. Además ha observado que esta cantidad es aproximadamente proporcional a la superficie de las placas de plomo; fundándose en estos hechos experimentales ha construído acumuladores formados por dos láminas de plomo de mucha superficie arrolladas en espiral y separadas una de otra por un aislador (fig. 83, *a*); este conjunto de láminas y aislador va sumergido en un vaso con agua acidulada.

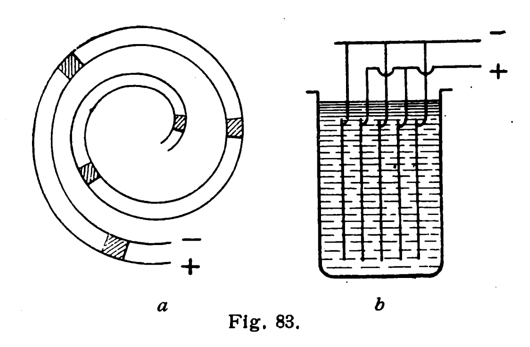


Fig. 83.

También ha construído acumuladores constituídos por varias placas sumergidas en agua acidulada contenida en un vaso (fig. 83, *b*). Las placas pares están unidas entre sí, y lo mismo las placas impares, de modo que el sistema funciona como si fuera un acumulador con dos láminas que tienen de superficie, una de ellas la suma de las superficies de las placas pares, y la otra la suma de las superficies de las placas impares.

Formación de las placas.—*Formación natural o Planté.*—Gastón Planté observó que la capacidad de un acumulador, esto es, la cantidad de electricidad absorbida en la carga o desprendida en la descarga, así como también el espesor de la materia activa,

aumentaban a medida que aumentaba el número de cargas y descargas efectuadas en el aparato.

Para obtener acumuladores de capacidad conveniente es preciso, por lo tanto, someterlos a un gran número de cargas y descargas sucesivas y de invertir con frecuencia el sentido de las corrientes, esto es, someterlos a cargas y descargas sucesivamente en los dos sentidos.

Estas operaciones son muy largas y constituyen la formación de las placas; este sistema se llama *formación natural* o *formación Planté.*

Formación artificial o *formación Faure.*—En este tipo de placas ideadas por Faure, la materia activa, en vez de estar constituída a expensas del soporte, está formada por óxidos o sales de plomo convenientemente fijados sobre éste.

Las placas tienen la forma de rejas, de plomo antimonioso, teniendo en sus intervalos una pasta que se transforma rápidamente bajo la influencia de la corriente en materia activa: plomo esponjoso y peróxido de plomo. Dicha pasta está formada generalmente de óxido de plomo: minio para las placas positivas y litargirio para las negativas.

Los acumuladores de este tipo se forman rápidamente y tienen, a igualdad de peso, una capacidad superior a la que se obtiene por medio de placas de formación natural.

Sin embargo, las placas de formación artificial, al menos las positivas, son menos consistentes que las placas de formación natural; bajo la influencia de los gases que se desprenden entre el soporte y la materia activa, ésta se disgrega y cae en pedazos.

Los fines que persiguen todos los fabricantes de acumuladores son:

1.° Dar a los soportes una forma tal, que su con-

tacto con la materia activa sea lo más perfecto posible y que, durante la carga y descarga que producen un aumento de volumen de esta materia, no puede ésta desprenderse ni alabear o torcer las placas;

2.° Reducir al mínimo posible, cumpliendo las condiciones anteriores, el peso del soporte con relación al de la materia activa, de modo que se obtenga el máximo de capacidad posible por kilogramo de placa, es decir, el máximo de *capacidad específica*.

Acumulador mixto. — La experiencia enseña que, en los acumuladores de formación artificial, la oxidación de las placas positivas ocasiona la caída de la materia activa y la disgregación del soporte con bastante rapidez, mientras que las placas negativas resisten mucho más tiempo.

Ateniéndose a este hecho experimental, se han utilizado en un mismo acumulador placas positivas de formación natural y negativas de formación artificial; éstos son los acumuladores mixtos.

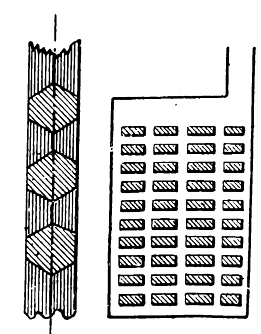
Para obtener una capacidad suficiente, las placas positivas están constituídas por varias tiras delgadas de plomo, teniendo así una gran superficie en contacto con el líquido.

Diferentes tipos de acumuladores. — Hay muchos tipos de acumuladores que difieren entre sí por su construcción, por la forma de las placas y por el procedimiento empleado para retener la materia activa. Describiremos, sin entrar en detalles, algunos de ellos:

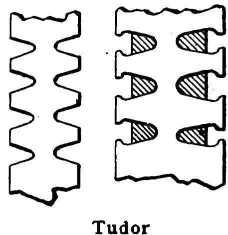
Acumuladores Gadot.—Las placas están divididas en dos mitades unidas entre sí por roblones de plomo y entre las cuales están sujetas las pastillas de materia activa (fig. 84).

Acumuladores Fulmen.—El soporte es una rejilla de plomo antimonioso rodeado de una envoltura de celuloide agujereado; entre la rejilla y el celuloide está la pasta de óxido.

Acumuladores de la «Sociedad para el trabajo eléctrico de los metales» (T. E. M.).—Las placas positivas son de alma central llena, con ranuras horizontales que forman cavidades llenas de pasta. Las negativas están compuestas de cloruro de plomo y de cloruro de zinc; estas pastillas están dispuestas regularmente en un molde en que se vierte plomo antimonioso que las sujeta fuertemente formando así una placa. Estas placas van colocadas en un baño de agua acidulada, donde se ponen en contacto con una lámina de zinc, formándose un elemento de pila; el cloruro de plomo se transforma en plomo esponjoso, el cloruro de zinc se disuelve y se elimina por lavados sucesivos.



Gadot
Fig. 84.



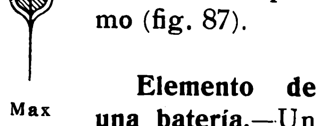
Tudor
Fig. 85.

Acumuladores Tudor. — Las placas son bastante gruesas y tienen ranuras horizontales profundas en las que se fija la materia activa; estas placas se prensan para asegurar la estabilidad del óxido. Las positivas son ordinariamente de formación natural; en este caso, los soportes están acanalados con muchos surcos horizontales y muy juntos unos de otros, de modo que presentan una superficie considerable (fig. 85).

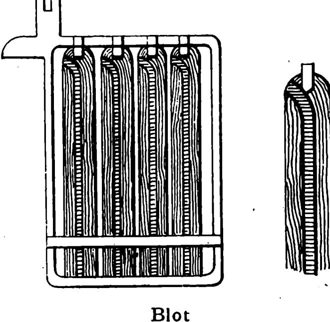
Acumulador Max.—Las placas están constituídas

por un sistema de varillas formadas por un hilo de plomo antimonioso laminado rodeado de una pasta de óxido que se sujeta por medio de una cubierta de amianto trenzado (fig. 86).

Acumulador Blot de formación natural.—Las placas están formadas por lanzaderas que se obtienen arrollando sobre una lámina de plomo tiras de plomo largas y onduladas. Estas lanzaderas van encajadas en un bastidor de plomo (fig. 87).



Max
Fig. 86.



Blot
Fig. 87.

Elemento de una batería.—Un elemento está formado por un cierto número de placas positivas y de placas negativas, cuyo número depende de la capacidad que se quiere obtener (fig. 88).

Las placas están dispuestas en un vaso, generalmente de vidrio, y a veces de madera inyectada forrada de plomo; en la parte superior llevan una prolongación o cola de plomo. Todas las colas positivas están unidas a una misma lámina de plomo por medio de soldadura autógena; análogamente todas las colas negativas están unidas a una misma lámina de plomo. Se mantienen a cierta distancia del fondo del vaso para que la materia activa no pueda tocar sus extremos y establecer entre ellas un cortocircuito.

Cuando el vaso es de vidrio, las placas descansan en los bordes por sus prolongaciones (fig. 89); si es de madera recubierta de plomo, descansan por medio

de orejillas sobre el borde de una lámina de vidrio colocada oblicuamente (fig. 90).

Las placas de un elemento están dispuestas de tal manera que una positiva se encuentra entre dos negativas de modo que los extremos son siempre dos negativas. Si, por el contrario, una positiva tuviera una negativa frente a una sola de sus caras, estaría sometida a la acción de la corriente por un solo lado, y se deformaría, mientras que, en las mismas condiciones, una negativa no se deforma.

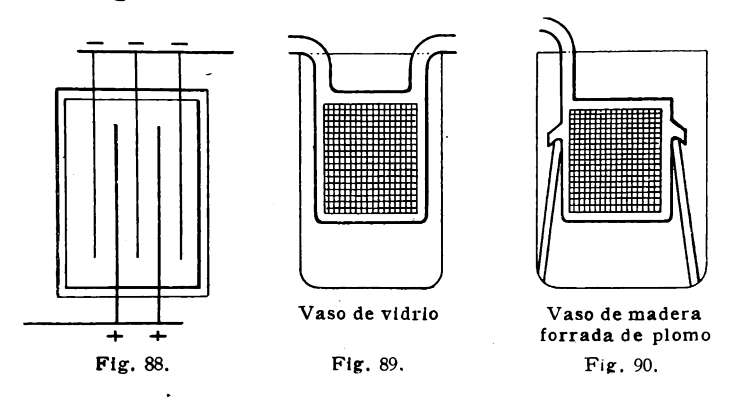


Fig. 88. — Vaso de vidrio. Fig. 89. — Vaso de madera forrada de plomo. Fig. 90.

Las placas de polaridad diferente están separadas unas de otras por tubos de vidrio para que no pueda haber contacto alguno entre ellas.

Instalación de una batería de acumuladores.—Una batería de acumuladores tiene que estar instalada en un sitio seco, bien iluminado y ventilado; no debe exponerse a los rayos solares y su temperatura ha de oscilar entre los 5° y los 20°. Los vasos han de estar aislados cuidadosamente, para lo cual se colocarán sobre aisladores que descansan sobre caballetes de madera, que a su vez se apoyan sobre aisladores de aceite (fig. 91).

Los elementos se montan generalmente en serie: el sistema de placas positivas de cada elemento está unido

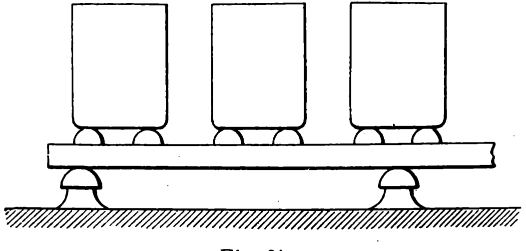


Fig. 91.

por soldaduras autógenas a las placas negativas del elemento siguiente (fig. 92).

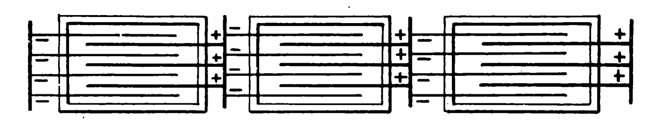


Fig. 92.

Electrolito.—Cuando se tiene montada la batería se llenan los vasos de agua acidulada o electrolito.

El electrolito está formado de agua destilada y de ácido sulfúrico químicamente puro, de 22 grados Baumé, a 15° de temperatura, que corresponde a una densidad igual a 1,18. Se obtiene esta concentración mezclando 25 partes en peso de ácido sulfúrico con 70 partes de agua destilada.

La mezcla debe hacerse en garrafas con gran precaución, echando el ácido en el agua, porque si se vertiera el agua en el ácido se produciría una brusca elevación de temperatura, que daría lugar a una violenta proyección de ácido.

La mezcla de agua y ácido se calienta considerablemente y antes de echarla en los vasos es preciso

esperar a que esté a la temperatura ambiente. Las placas han de estar completamente bañadas por el electrolito, quedando sus bordes superiores uno o dos centímetros por debajo del nivel de éste.

Carga de la batería.—Preparada de este modo la batería se procede a cargarla, uniendo sus polos extremos a los bornes de un generador por medio de un circuito que comprende: un interruptor (fig. 93), un reostato, un amperímetro y un disyuntor, cuyo objeto es cortar automáticamente el circuito, si la fuerza electromotriz de la batería se hace superior a la del

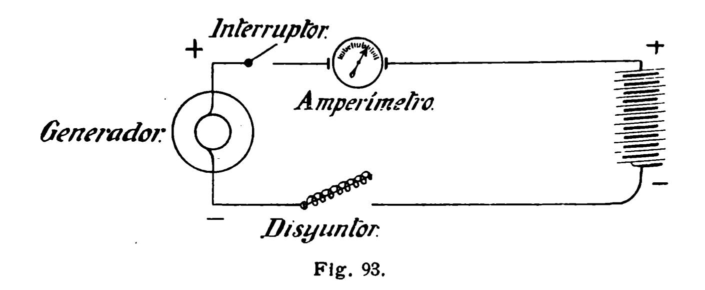


Fig. 93.

generador (el circuito queda cortado antes que se produzca la inversión de la corriente, desde que la intensidad se hace menor que un cierto valor determinado previamente).

El reostato es necesario para la primera carga, que es la que produce la formación de las placas en el caso de acumuladores de formación natural o de acumuladores en que sólo las placas positivas son de formación natural, porque la fuerza contra-electromotriz que opone la batería al generador es entonces casi nula, la resistencia interior es también muy pequeña, y la corriente sería excesiva si no se interpusiera entre el generador y la batería una resistencia suficiente. Se

regula la resistencia de este reostato de modo que la corriente no pase de un valor determinado dado por el constructor.

A medida que la batería se carga, la fuerza electromotriz se va elevando y se disminuye progresivamente la resistencia del reostato hasta poderla suprimir por completo.

A partir de este momento se mantiene la corriente sensiblemente constante, modificando convenientemente la fuerza electromotriz de la dinamo generatriz.

Corriente de carga.—La batería funciona durante la carga como un receptor cuya fuerza contra-electromotriz es E, por ejemplo. Por consiguiente, si E es la fuerza electromotriz del generador y si R es la resistencia total del circuito, comprendiendo la de la batería, la del generador y la de los conductores, la corriente de carga será:

$$I = \frac{E - E'}{R}.$$

Variaciones de la fuerza electromotriz de un elemento con la carga. — Un acumulador no se debe descargar nunca completamente; su fuerza electromotriz no ha de bajar de 1,8 volts. Al empezar la carga, su fuerza electromotriz se eleva bruscamente a 1,9 volts y después se mantiene a 2 volts aproximadamente durante toda la carga; al terminar ésta se eleva bruscamente a 2,2 volts.

Diferencia de potencial entre los electrodos durante la carga.—Si en un instante determinado de la carga, la fuerza electromotriz de un elemento es E, siendo I la corriente de carga, y si R es su resistencia interior, la diferencia de potencial entre sus electrodos es:

$$u = E + R I,$$

de modo que la medida de esta diferencia de potencial no puede caracterizar el estado de carga del elemento sino a condición de cargarlo con una corriente determinada. Esta diferencia de potencial asciende, al terminar la carga, a 2,5 ó 2,7 volts.

La curva de la figura 94 representa las variaciones de la fuerza electromotriz durante la carga.

Fin de la carga.— Es muy importante poder reconocer el momento en que el elemento está completa-

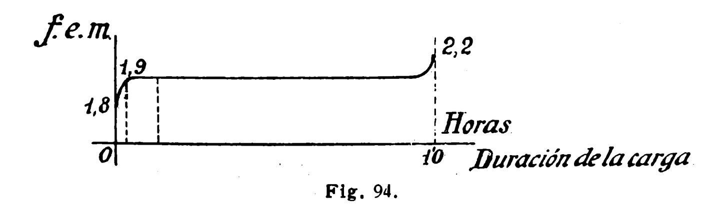


Fig. 94.

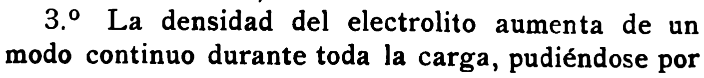
mente cargado; también es muy útil algunas veces poder determinar, en un instante cualquiera, en qué punto se está de la carga, es decir, poder apreciar aproximadamente el tiempo durante el cual se ha de continuar la carga.

Los indicios de fin de carga son los siguientes:

1.° El voltímetro indica un voltaje creciente con la carga, y ésta es completa cuando, después de haber cortado la corriente, el voltaje es de 2,2 volts por elemento;

2.° Al fin de la carga, la corriente no produce más efecto que el de descomponer el agua; los gases que no son fijados por la materia activa se desprenden en abundancia y remueven las partículas depositadas en el fondo del vaso, enturbiando el electrolito;

Densímetro
Fig. 95.



3.° La densidad del electrolito aumenta de un modo continuo durante toda la carga, pudiéndose por

consiguiente seguir el estado de carga, por medio de un densímetro sumergido en el líquido. Este densímetro tiene marcadas en general dos señales, en que la inferior corresponde a la carga total y la superior a la descarga completa (fig. 95).

Descarga de la batería.—Terminada la carga, al separar la batería del generador, el voltaje en los bornes, que era durante la carga de 2,5 a 2,7 volts por elemento, cae bruscamente a 2,2 volts, valor de la fuerza electromotriz en carga completa.

Al empezar a descargarse la batería, la fuerza electromotriz cae súbitamente a 2 volts y se mantiene sensiblemente constante en este valor hasta terminar la descarga; entonces cae bruscamente a 1,8 volts, quedando la batería prácticamente descargada por completo.

Hay que tener en cuenta que la diferencia de potencial entre los bornes durante la descarga es siempre

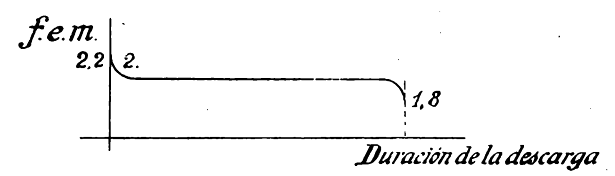


Fig. 96.

menor que la fuerza electromotriz, porque tiene por valor:

$$u = E - RI,$$

siendo I la corriente de descarga y R la resistencia interior. Por esta causa el voltímetro indicará durante la descarga 1,8 volts por elemento, antes de la descarga completa.

La curva de la figura 96 representa las variaciones

de la fuerza electromotriz de un elemento durante la descarga.

Corriente de descarga.—Sea E la fuerza electromotriz de la batería, R su resistencia interior y r la resistencia del circuito exterior; la corriente de descarga es:

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

Acoplamiento de los acumuladores. — Todo lo expuesto acerca del acoplamiento de las pilas se aplica igualmente al acoplamiento de los acumuladores.

Sulfatación de las placas.—Una batería de acumuladores ha de vigilarse continuamente y con gran atención; es preciso comprobar el voltaje de cada elemento y la densidad del electrolito al terminar la carga; también es necesario cuidar que la corriente de descarga no exceda de un valor máximo dado por el constructor, y que no se produzca un corto-circuito entre las placas a causa de la caída de materia activa o del alabeamiento de las mismas. La batería no debe estar demasiado tiempo sin utilizarse; en caso de tener que estar sin funcionar durante algunas semanas, es preciso, después de la última carga, someterla a una sobrecarga de varias horas; si aun tiene que estar más tiempo sin ser utilizada es necesario, después de una sobrecarga, vaciar los vasos, lavar las placas con mucha agua y llenar los vasos de agua destilada o poner las placas al abrigo del aire en aserrín de madera, si se pueden sacar.

En el caso de no adoptar estas precauciones, es decir, si se carga o descarga una batería con una corriente demasiado elevada, o si se deja que se produzcan corto-circuitos, etc., la composición química de

las placas se modifica, recubriéndose de una capa de *sulfato* que impide que se verifiquen las reacciones y que poco a poco va haciendo inservible al elemento.

Indicios de sulfatación de las placas.—Cuando ha empezado la sulfatación de las placas, hay que procurar inmediatamente impedir su continuación. Los indicios de sulfatación son:

1.° *Placas positivas.*—Su tinte, en vez de ser violeta oscuro, se vuelve grisáceo; son ásperas al tacto en los bordes, mientras que en estado normal son perfectamente lisas.

Si se prolonga la sulfatación, se deforman o alabean.

2.° *Placas negativas.*—Toman un aspecto lechoso, mientras que normalmente son de color gris azulado.

3.° *Electrolito.* — Al terminar la carga, en el momento en que se forman las burbujas, el densímetro indica un valor menor que el que corresponde a la carga completa.

En cuanto se nota que se sulfata un elemento, hay que someterlo a una serie de sobrecargas tan largas y frecuentes como sea necesario. Después de cada sobrecarga, hay que comprobar que la densidad del líquido ha aumentado y se considera que la sulfatación ha desaparecido cuando las placas adquieren su primitiva apariencia y la densidad al terminar la carga ha alcanzado su valor normal.

Si la sulfatación es muy profunda, es preciso separar el elemento de la batería, acepillar con mucho cuidado las placas, enderezarlas si están alabeadas y someter después el elemento a largas y frecuentes sobrecargas; o mejor aun, cargarlo lentamente con corriente de poca intensidad en un electrolito de poca densidad (8 a 9° Baumé).

Constantes de un acumulador. — 1.° *Régimen.* — Es la intensidad de la corriente cuyo valor no se ha de sobrepasar ni en la carga ni en la descarga; para un mismo tipo de acumulador, el régimen es proporcional al peso de las placas de un elemento y varía, según los tipos, entre 0,5 y 1,5 amperes por kilogramo para la carga y entre 1 y 2 amperes por kilogramo para la descarga.

2.° *Capacidad.* — Es la cantidad que puede proporcionar un elemento completamente cargado, hasta su descarga completa (f. e. m.: 1,8 volts); la capacidad se expresa en ampere-horas; para un mismo tipo de acumuladores es proporcional al peso de las placas por elemento y varía, según los tipos, de 10 a 15 ampere-horas por kilogramo de placas.

La capacidad depende de la intensidad de la corriente de descarga; siendo tanto más grande cuanto menor es la corriente. Los constructores dan generalmente para un mismo modelo varias capacidades correspondientes a diferentes intensidades de la corriente de descarga; por ejemplo, para un tipo de acumulador Tudor, las capacidades indicadas son:

Duración de la descarga	Intensidad de la corriente	Capacidad
3 horas	64 amperes	192 ampere-horas
5 »	44 »	220 »
7,5 »	32 »	240 »
10 »	20 »	260 »

La capacidad y el régimen de una batería de elementos montados en serie son, como dijimos para las pilas, los mismos que los de un solo elemento.

3.° *Energía utilizable.* — Es la energía que puede proporcionar una batería desde su carga completa hasta su descarga prácticamente completa; se expresa en watt-horas y se obtiene multiplicando el número

que mide su capacidad expresada en ampere-horas por el que mide su fuerza electromotriz media, que es de 2 volts por elemento.

4.° *Rendimiento.* — Rendimiento en cantidad: es la relación entre la cantidad recogida en la descarga y la absorbida en la carga; con un régimen conveniente, este rendimiento es del orden del 95 por 100.

Rendimiento en energía: es la relación entre la energía recogida en la descarga y la facilitada para la carga.

Si C ampere-horas es la cantidad recogida en la descarga y E la fuerza electromotriz media de la batería, la energía utilizable es $C\,E$ watt-horas.

Si C' es la cantidad gastada en la carga y E' el voltaje entre los bornes de la batería, el rendimiento en energía es:

$$\frac{C\,E}{C'\,E'}, \quad \text{o bien} \quad \frac{C}{C'} \times \frac{E}{E'};$$

$\frac{C}{C'}$ es el rendimiento en cantidad.

Resistencia interior. — La resistencia interior de un acumulador es siempre muy pequeña, del orden de la milésima de ohm.

EJEMPLO. — *Sea una batería de 50 elementos en serie; cada elemento tiene 30 kilogramos de placas; el régimen es de 1,5 amperes y la capacidad es de 10 ampere-horas por kilogramo.*

1.° Fuerza electromotriz de la batería:

$$50 \times 2 = 100 \text{ volts};$$

2.° Régimen, que es el de un solo elemento:

$$30 \times 1{,}5 = 45 \text{ amperes};$$

3.° Capacidad, que es la de un solo elemento:

$$30 \times 10 = 300 \text{ ampere-horas;}$$

4.° Energía utilizable:

$$300 \times 100 = 30000 \text{ watt-horas, o sea } 30 \text{ kilowatt-horas.}$$

OBSERVACIÓN. — Supongamos que se haya utilizado la batería agrupándola en dos series de 25 elementos, montadas en paralelo.

1.° *Fuerza electromotriz.* — Es la de un grupo de 25 elementos en serie, que es:

$$25 \times 2 = 50 \text{ volts;}$$

2.° *Régimen.*—Cada grupo puede dar 45 amperes, y los dos grupos:

$$45 \times 2 = 90 \text{ amperes;}$$

3.° *Capacidad.* — Es igual a:

$$300 \times 2 = 600 \text{ ampere-horas;}$$

4.° *Energía utilizable:*

$$600 \times 50 = 30000 \text{ watt-horas, o bien } 30 \text{ kilowatt-horas.}$$

Se ve que dividiendo la batería en varios grupos idénticos de elementos en serie, montados en paralelo, se aumentan la capacidad y el régimen de la batería, se disminuye su fuerza electromotriz, y la energía utilizable permanece constante.

Empleo de los acumuladores. — Los acumuladores se emplean:

1.° Como depósitos de energía;

2.° Como reguladores: una batería de acumuladores, acoplada en paralelo con un generador, puede

contribuir a las variaciones rápidas de potencia que se necesitan de este generador. Si esta potencia ha de ser muy grande, la batería proporciona una parte; si demasiado pequeña, la batería absorbe el exceso producido por el generador. La regularidad que así se obtiene se debe a la poca resistencia interior de la bateria;

3.° Como transformador; agrupando de varios modos los elementos de una batería de acumuladores se puede hacer variar los factores de la potencia que puede producir: fuerza electromotriz y corriente. En el ejemplo anterior la potencia utilizable era de 4500 watts.

Agrupando los elementos en una sola serie, esta potencia es disponible bajo la forma: 100 volts, 45 amperes.

En dos series acopladas en paralelo, es disponible bajo la forma: 50 volts, 90 amperes.

CAPÍTULO VIII

Acciones químicas de las corrientes

Las corrientes no ejercen acción química sobre los cuerpos sólidos que recorren.

En cuanto a los líquidos, unos son malos conductores y se comportan como aisladores; éstos son: el alcohol, el éter, el agua químicamente pura...; en cambio otros son conductores, como son en general las soluciones de sales metálicas, de ácidos o de bases. Cuando estos últimos son atravesados por una corriente se producen fenómenos químicos; si los líquidos son cuerpos simples, como el mercurio y los metales fundidos, la corriente no ejerce acción química sobre ellos.

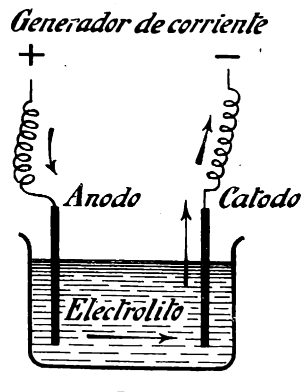


Fig. 97.

El líquido sometido a la acción de una corriente toma el nombre de *electrolito;* los conductores que lo ponen en comunicación con el generador de corriente son los *electrodos;* el que está unido al polo positivo es el electrodo positivo o *anodo,* y el que está unido al polo negativo es el electrodo negativo o *catodo* (fig. 97).

El fenómeno químico producido por la corriente se llama *electrolisis*.

Al pasar una corriente por un electrolito lo descompone en *iones*, de los cuales unos se dirigen al anodo y se llaman *aniones*, y otros al catodo y se llaman *cationes*. Pero también pueden producirse acciones químicas secundarias entre los iones y el electrolito o los electrodos.

Los cuerpos disueltos o fundidos que pueden servir como electrolitos están todos constituídos por un metal combinado con un radical: por ejemplo, el sulfato de cobre SO^4Cu está formado por un metal, el cobre, y por el radical SO^4; la sal marina *Cl Na* está formada por el metal sodio *Na* y por el radical cloro *Cl*. El hidrógeno se considera como un metal por tener la misma función que éstos en la electrolisis.

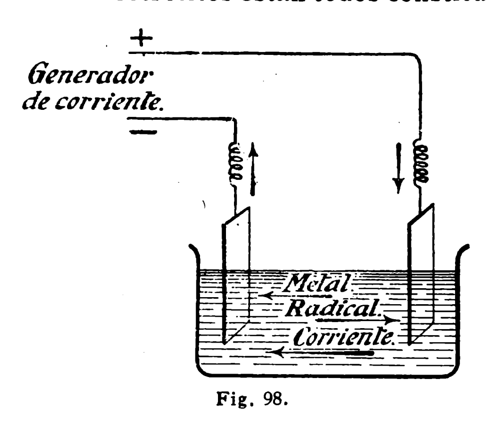


Fig. 98.

Bajo la acción de la corriente, el electrolito se descompone; el metal se separa del radical con que estaba combinado. El metal se dirige al electrodo negativo siguiendo la dirección de la corriente; el radical se dirige al electrodo positivo en sentido contrario al de la corriente (fig. 98).

EJEMPLO. — *Electrolisis del sulfato de cobre.* — El cobre se dirige al electrodo negativo depositándose sobre éste en forma de polvo rojo; el radical SO^4 se deposita sobre el electrodo positivo.

Si el electrodo no es atacable por el ácido sulfúrico, platino por ejemplo, el radical SO^4, reaccionando con el agua en que está disuelto el sulfato de cobre, la descompone, produciendo ácido sulfúrico con desprendimiento de oxígeno que se fija sobre el electrodo positivo:

$$SO^4 + H^2O = SO^4H^2 + O.$$

Si el electrodo es atacable por el ácido sulfúrico, cobre por ejemplo, el radical SO^4 se combinará con este metal formando sulfato de cobre que se disuelve en el electrolito.

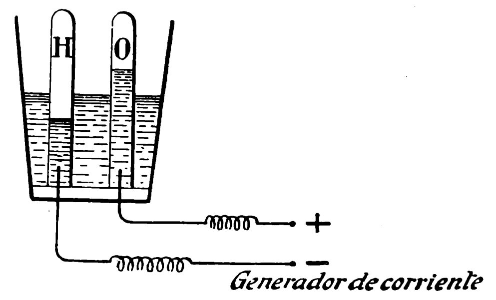


Fig. 99.

Electrolisis del agua acidulada. — Si se hace pasar una corriente a través de agua acidulada con ácido sulfúrico, el agua se descompone en sus elementos H y O que se pueden recoger en dos probetas previamente llenas del mismo líquido que rodean a los electrodos de platino. Este experimento se hace generalmente con un aparato llamado voltámetro, representado en la figura 99. Se comprueba que el hidrógeno se dirige al electrodo negativo y el oxígeno al electrodo positivo y que el volumen del hidrógeno es en cada momento doble del volumen de oxígeno. El fenómeno se verifica como si solamente se hubiera descompuesto el agua, pero en realidad hay descomposición del ácido sulfúrico $SO^4 H^2$; el hidrógeno se dirige al electrodo negativo y el radical SO^4 al electrodo positivo; este radical descompone

al agua para transformarse en ácido sulfúrico desprendiéndose el oxígeno.

Leyes de la electrolisis. — 1.ª *Los pesos de los cuerpos que entran en la formación de un electrolito y puestos en libertad en los electrodos durante un tiempo dado, son proporcionales a la cantidad de electricidad que ha atravesado el circuito durante ese tiempo.*

Un coulomb deposita sobre el electrodo negativo, sumergido en una solución de una sal de plata, 1,118 mg. de plata; en una solución de una sal de cobre, 0,327 mg. de cobre.

Supongamos, por ejemplo, que por una solución de nitrato de plata se hace pasar una corriente de 0,3 ampere; al cabo de una hora, la cantidad de electricidad que ha atravesado el electrolito es:

$$0{,}3 \times 3600 = 1\,080 \text{ coulombs};$$

el peso de plata depositada sobre el catodo es:

$$1{,}118 \text{ mg.} \times 1\,080 = 1{,}21 \text{ gr.}$$

2.ª *La cantidad de electricidad necesaria para poner en libertad el peso de un cuerpo igual a su equivalente químico es la misma para todos los cuerpos; esta cantidad es igual a 96 600 coulombs.*

El equivalente químico del cobre es 31,5; el del zinc, 33; el de la plata, 108; el del hidrógeno, 1.

Por consiguiente, se necesitarán 96 600 coulombs para poner en libertad 31,5 gramos de cobre, 33 gramos de zinc, 108 gramos de plata y un gramo de hidrógeno.

Se llama equivalente electroquímico de un metal al peso de este cuerpo puesto en libertad por electrolisis por la unidad de cantidad de electricidad; este

equivalente está expresado en miligramos por coulomb, o en gramos por ampere-hora.

Diferencia de potencial necesaria para producir una electrolisis.—Cuando se unen los dos electrodos al generador de corriente, se observa que ésta no atraviesa al electrolito más que cuando la diferencia de potencial aplicada entre los electrodos es superior a un cierto valor, que depende de la naturaleza del electrolito. Este valor recibe el nombre de *fuerza contra-electromotriz de polarización;* para una solución de un mismo cuerpo, varía con su concentración, su temperatura y la naturaleza de los electrodos.

Si E es esta fuerza contra-electromotriz y si se aplica entre los electrodos una diferencia de potencial u, la corriente en el electrolito cuya resistencia es R, tiene por valor:

$$I = \frac{u - E}{R}.$$

La fuerza contra-electromotriz de polarización del agua acidulada, siendo los electrodos de platino, es 1,48 volts. Para descomponer esta agua se necesitará, por lo tanto, una fuerza electromotriz superior a 1,48.

Aplicaciones de la electrolisis.— I. Galvanoplastia.—La galvanoplastia tiene por objeto depositar, por electrolisis, una capa metálica adherente sobre un cuerpo conductor, un metal por ejemplo, o sobre un cuerpo no conductor cuya superficie ha sido recubierta con plombagina para hacerla conductora.

El objeto que se ha de cubrir con la capa metálica se sumerge en una solución salina del metal que se quiere depositar, y se une al polo negativo de un generador de corriente, estando constituído el elec-

trodo positivo por una lámina de este mismo metal.

Cobreado.— El electrolito es una solución saturada de sulfato de cobre con un poco de ácido sulfúrico.

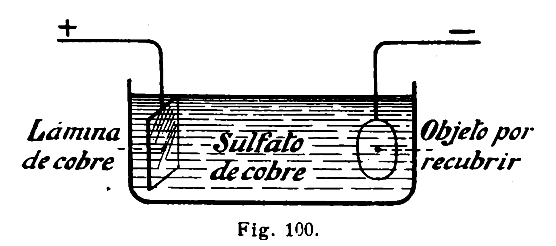


Fig. 100.

El objeto que se quiere cobrear se ha decapado perfectamente y constituye el catodo; el anodo es una lámina de cobre (fig. 100).

Hemos visto que el cobre se fija sobre el catodo y se deposita sobre el objeto; en el anodo aparece el radical SO^4, que se combina con el cobre para formar sulfato de cobre, que se disuelve. Por consiguiente, todo se verifica como si el cobre del anodo se transportara al catodo. La densidad de la corriente (corriente específica) ha de ser de 2 amperes por decímetro cuadrado.

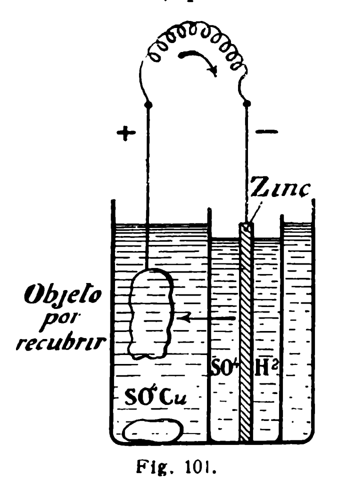


Fig. 101.

En el caso en que se tenga que depositar cobre sobre objetos de pequeñas dimensiones, se puede operar del modo siguiente:

El objeto que se ha de cobrear constituye el polo positivo de una pila Daniell en que el polo negativo está formado por una lámina de zinc sumergida en agua acidulada contenida en un

vaso de gres, cerrándose esta pila sobre sí misma, es decir, uniendo directamente sus dos polos (fig. 101).

La corriente atraviesa la pila, yendo en su interior del polo — al polo +, es decir, del zinc al objeto. Esta corriente, al atravesar el sulfato de cobre lo descompone, y el cobre marcha en el sentido de la corriente, o sea hacia el objeto. La solución se mantiene constantemente saturada mediante cristales de sulfato de cobre.

Niquelado. — Los objetos se decapan cuidadosamente y se colocan como catodo en una solución de sulfato doble de níquel y amonio, estando constituído el anodo por una lámina de níquel. Densidad de la corriente al empezar: 1,25 amperes, y después 0,25 ampere por decímetro cuadrado.

Plateado. — El electrolito es una solución de cianuro doble de plata y de potasio; densidad: 0,5 ampere por decímetro cuadrado.

Dorado. — El electrolito es una solución de cianuro de potasio y de cloruro de oro; densidad: 0,1 ampere por decímetro cuadrado. La operación se hace generalmente en caliente, manteniendo el baño a unos 75° aproximadamente.

II. Vaciado. — Para reproducir objetos, como por ejemplo una medalla o un bajorrelieve, se empieza por hacer un molde, con gutapercha, yeso, estearina, etc., que da una reproducción exacta del objeto. La gutapercha se remoja en agua caliente (a unos 60° ó 70°) y se aplica sobre el objeto. Después de haber obtenido el molde, se endurece por enfriamiento; a continuación se recubre de plomblagina y se coloca como catodo en un baño de sulfato de cobre. La corriente ha de ser débil, sobre todo al principio, y no sobrepasar de un ampere por decímetro cuadrado. Cuando el depósito alcanza un espesor suficiente, se le separa de la gutapercha a que estaba adherido.

III. Electrotipia. — Cuando se quieren obtener muchos ejemplares de un grabado hecho sobre madera, es preciso obtener una reproducción capaz de resistir sin alterarse los efectos de la prensa. Para conseguirlo se empieza por hacer, como en el caso anterior, un molde de gutapercha; se deposita por electrolisis una capa de cobre y se refuerza por detrás con una aleación fusible.

IV. Fotograbado. — Se insola una placa de gelatina bicromatada debajo de un negativo fotográfico, y se deposita sobre ella una capa de cobre en que los relieves quedan bastante pronunciados para obtener un clisé que puede dar muy buenas pruebas.

V. Fabricación electrolítica de productos químicos.—La fabricación por electrolisis de muchos productos, obtenidos hasta hace pocos años por procedimientos exclusivamente químicos, tiende a generalizarse y extenderse cada vez más. Por ejemplo, la electrolisis de una solución de cloruro sódico que da sodio e hidrógeno en el catodo y cloruro e hidrógeno en el anodo, es el punto de partida para la fabricación industrial de la sosa cáustica, de los cloratos, percloratos, hipercloratos, cloroformo, yodoformo, etc.

VI. Tratamiento electrolítico de las soluciones metálicas. — La electrolisis se utiliza también en la industria para la afinación y extracción de los metales; de este modo se obtiene el cobre puro, por la electrolisis del sulfato de cobre; el oro, por la electrolisis de una solución de cianuro de oro, etc.

CAPITULO IX

Magnetismo y electromagnetismo

Los fenómenos eléctricos están íntimamente relacionados con otros fenómenos llamados magnéticos producidos por imanes y cuyo estudio es muy importante.

Por ejemplo, más adelante veremos que los generadores mecánicos de electricidad son máquinas en cuyos circuitos se producen corrientes eléctricas al pasar por delante de imanes. Estos imanes están a su vez producidos por corrientes.

Dividiremos el estudio del magnetismo en tres partes:

1.ª Los imanes y sus propiedades;
2.ª La producción de imanes por las corrientes;
3.ª La producción de corrientes por los imanes.

I. Imanes. — Sus propiedades

Se sabe que existe un mineral de hierro, el óxido magnético o magnetita, que tiene la propiedad de atraer al hierro y que se designa con el nombre de *piedra imán.*

Un imán o barra imanada es un trozo de acero que ha adquirido esta propiedad mediante un tratamiento especial; es decir, que el acero ha adquirido una nueva

propiedad que se manifiesta en presencia del hierro.

Cualquiera que sea la posición del hierro respecto al imán, todo se verifica como si el hierro estuviera sometido a dos fuerzas cuyas direcciones pasan por

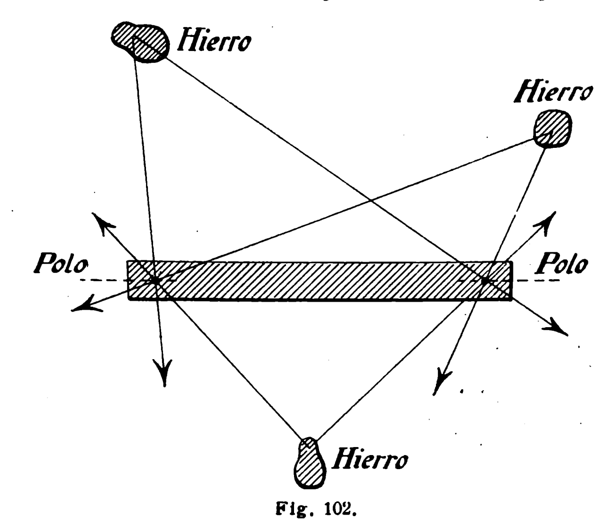


Fig. 102.

dos puntos fijos situados en las proximidades de los extremos de la barra: éstos son los *polos* de la barra.

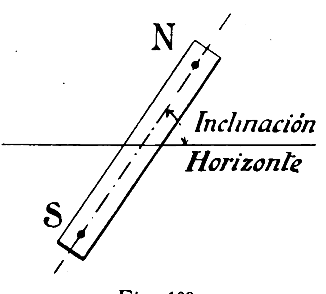


Fig. 103.

La recta que une los polos de un imán es el *eje magnético* de este imán (fig. 102).

Un imán suspendido por su centro de gravedad, se orienta siempre en la misma dirección; su eje toma aproximadamente la dirección geográfica norte-sur.

Este eje forma con el horizonte un cierto ángulo que se llama *inclinación magnética* y cuyo valor depende del lugar de la Tierra en que se encuentra (fig. 103).

El plano vertical que pasa por el eje del imán recibe el nombre de *meridiano magnético* del lugar: este plano forma con el meridiano geográfico del mismo lugar un ángulo que se llama *declinación magnética del lugar* (fig. 104).

Se da el nombre de polo norte del imán al que se dirige hacia el norte, y polo sur al que se dirige hacia el sur.

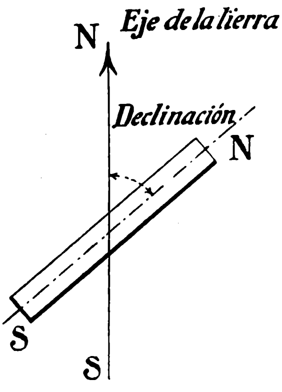


Fig. 104.

Acciones mutuas de dos imanes.—Supongamos un imán móvil alrededor de su centro de gravedad; si se le acercan sucesivamente los dos polos de su imán, se observa que los polos del mismo nombre en ambos imanes (los dos polos norte o los dos polos sur) se repelen, mientras que los polos de nombre contrario se atraen.

Si se tienen dos imanes, uno fijo NS y otro móvil $N_1 S_1$ alrededor de un eje perpendicular a los ejes magnéticos de ambos, se observa que el imán fijo orienta al imán móvil en su misma dirección, de tal modo que los polos de nombre contrario quedan enfrente unos de otros (figura 105). Por consiguiente, por orientarse por sí solo un imán móvil alrededor de su centro de gravedad se puede admitir que esta orientación es debida a la acción de la Tierra, es decir, al *magnetismo terrestre*.

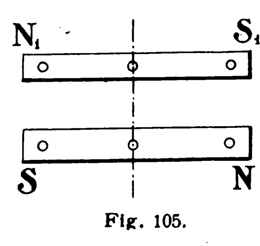


Fig. 105.

En efecto, todo ocurre como si en el interior de la Tierra hubiera un potente imán dirigido aproximada-

mente según el eje terrestre con su polo norte hacia el sur geográfico.

Si se suspende por su centro de gravedad un sistema de dos imanes solidariamente unidos entre sí, paralelos y con los polos de nombre contrario enfrente unos de otros, la Tierra ejercerá sobre cada uno de ellos acciones iguales y opuestas, y por consiguiente no tendrá efecto alguno sobre el sistema. Este sistema se llama *astático*.

Si los dos imanes no son idénticos, la acción ejercida por la Tierra sobre uno de ellos será superior a la que ejerce sobre el otro, y el conjunto tomará la dirección resultante de la diferencia entre las dos acciones.

Masa magnética.—Momento magnético de un imán. —Para explicar los fenómenos magnéticos se admite que existe en cada polo del imán una cierta cantidad de un agente que se llama *magnetismo,* y se dice que en cada polo hay una cierta *masa magnética.*

Un estudio más profundo nos dice que estas dos masas son iguales, habiéndose convenido en dar el signo + a la que está en el polo norte, y el signo — a la que está en el polo sur. De estas convenciones resulta que un imán puede considerarse como formado por dos masas magnéticas iguales y de signos contrarios $+ m$ y $- m$, situadas a cierta distancia l y solidarias entre sí (fig. 106).

Fig. 106.

El producto $m \times l$ recibe el nombre de *momento magnético* del imán.

Un imán está caracterizado por su momento magnético y por la distancia l entre sus polos, o longitud del imán.

Las masas magnéticas de los polos no pueden medirse directamente; existen muchos métodos, cuyo estudio es superior al carácter de este tratado, que permiten determinar el momento magnético de un imán.

Conociendo el momento magnético $\mathcal{M}$ y la longitud l del imán, se deduce el valor de la masa magnética en cada polo, por la relación:

$$\mathcal{M} = m \times l,$$

de donde:

$$m = \frac{\mathcal{M}}{l}.$$

De aquí se deduce que si $\mathcal{M} = 1$ y $l = 1$, se tendrá $m = 1$; por consiguiente la unidad de masa magnética es el valor de cada una de las masas magnéticas de los polos norte y sur de un imán cuya longitud es igual a la unidad y cuyo momento magnético es igual a la unidad.

Imanación por influencia. — La experiencia nos enseña que si se acerca una barra de hierro dulce a un imán, esta barra se imana, y en su extremo más próximo a uno de los polos del imán se crea un polo de nombre contrario al de este polo (fig. 107). Se dice que la barra de hierro se ha imanado por influencia. La imanación desaparece al alejar el imán.

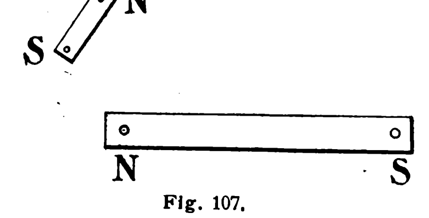


Fig. 107.

Campo magnético.—Líneas de fuerza.—Si se mueve una pequeña aguja imanada en las proximidades de

un imán, se observa que esta aguja toma orientaciones distintas, según el punto en que se encuentra; por lo tanto, en cada punto hay una fuerza que obra sobre la aguja, dependiendo la dirección de esta fuerza de la posición del punto respecto al imán.

La dirección de la fuerza en cada punto puede determinarse fácilmente por el siguiente experimento:

Se extienden sobre una hoja de papel fuerte o sobre una lámina de vidrio colocada sobre un imán, limaduras de hierro: se observa que estas limaduras se disponen de modo que forman líneas curvas regulares que van de un polo al otro. Esto se debe a que cada partícula de limadura se imana por influencia y se orienta en la dirección de la fuerza creada por el imán en el punto en que se encuentra, disponiéndose las partículas unas a continuación de otras bajo la influencia de estas fuerzas, con todos los polos norte hacia un lado y los polos sur hacia otro. Una aguja imanada colocada en un punto de la curva se orienta tangencialmente a esta curva, determinándose así la dirección de la fuerza creada por el imán en este punto (fig. 108).

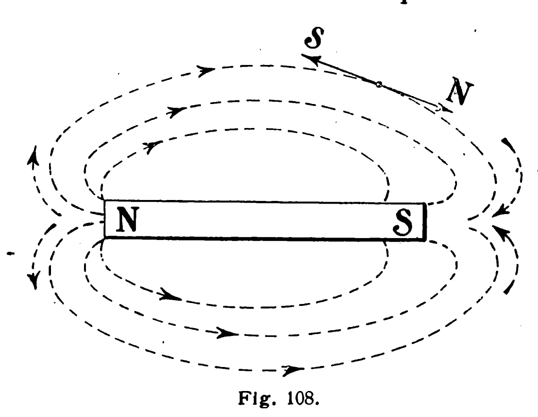


Fig. 108.

Las curvas así trazadas reciben el nombre de *líneas de fuerza;* se admite que tienen un sentido y que están dirigidas del polo norte al polo sur.

La región del espacio comprendida entre las líneas

de fuerza y por consiguiente donde se manifiesta la acción del imán sobre una aguja imanada o una barra de hierro se llama *campo magnético* creado por el imán.

Se llama *intensidad del campo* en un punto la fuerza que ejerce el imán sobre una masa magnética igual a la unidad situada en dicho punto.

La dirección de esta fuerza es la del campo en el punto considerado. La unidad de intensidad del campo es el *gauss*.

Si un campo tiene en un punto una intensidad igual a $\mathcal{H}$ gauss, ejercerá sobre una masa magnética igual a m colocada en ese punto una fuerza cuyo valor es $\mathcal{H} \times m$.

La dirección de la fuerza que ejerce sobre una masa magnética norte o positiva es igual y directamente opuesta a la que ejercería sobre una masa sur o negativa del mismo valor situada en el mismo punto.

Campo uniforme.— Se dice que un campo es uniforme cuando en cada uno de sus puntos tiene la misma intensidad y la misma dirección; de aquí resulta que las líneas de fuerza de un campo uniforme son líneas rectas paralelas.

Representación de un campo.—Faraday representa un campo por un número de líneas de fuerza que atraviesan una superficie plana de un centímetro cuadrado, colocada perpendicularmente a su dirección, igual al número que mide la intensidad del campo.

Según esta convención, diremos que si un campo tiene una intensidad de $\mathcal{H}$ gauss en una cierta región, hay en esta región $\mathcal{H}$ líneas de fuerza por centímetro cuadrado. Hay que tener en cuenta que esto no es más que una convención, que el número de líneas de fuerza

no puede medirse y que por un punto cualquiera del campo pasa una línea de fuerza.

De esta convención se deduce que un campo uniforme está representado por líneas de fuerza rectilíneas, paralelas, equidistantes, y que están tanto más próximas entre sí cuanto mayor es la intensidad del campo.

Acción de un campo sobre una aguja imanada.— Supongamos que en un campo magnético uniforme se coloca una aguja imanada de longitud l y cuyas masas magnéticas en los polos son $+m$ y $-m$.

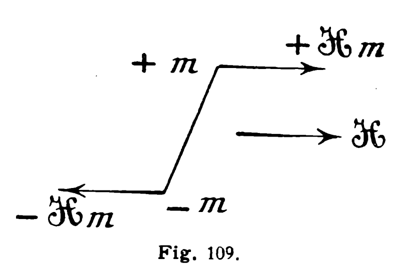


Fig. 109.

Sea $\mathscr{H}$ la intensidad del campo: sobre la masa $+m$ del polo norte se ejerce una fuerza $\mathscr{H}m$ y sobre la masa sur $-m$ se ejerce una fuerza igual a la primera y dirigida en sentido contrario. La aguja está, pues, sometida a un par (figura 109).

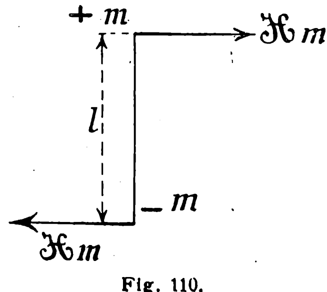


Fig. 110.

Expresión del par ejercido por el campo sobre el imán. — 1.º *El eje del imán es perpendicular a la dirección del campo*. — Se sabe que el par tiene por valor el producto del número que expresa la fuerza que se ejerce sobre cada polo, $\mathscr{H}m$, por el que mide la distancia entre las dos fuerzas, l (fig. 110).

El valor de este par es, por consiguiente:

$$C = \mathcal{H} m \times l.$$

Ahora bien, $m\,l$ es el momento magnético $\mathcal{M}$ del imán, luego

$$C = \mathcal{H}\mathcal{M}.$$

2.° *El eje forma un ángulo* α *con el campo.* — El par tiene por valor (fig. 111):

$$C = \mathcal{H} m \times AH,$$

Fig. 111.

siendo AH la longitud de la perpendicular común a la dirección de las dos fuerzas.

En el triángulo ABH se tiene:

$$AH = AB \text{ sen } \alpha, \quad \text{o sea} \quad AH = l \text{ sen } \alpha,$$

y sustituyendo en el valor de C:

$$C = \mathcal{H} m \times l \text{ sen } \alpha.$$

Pero $m\,l = \mathcal{M}$, luego:

$$C = \mathcal{H}\mathcal{M} \text{ sen } \alpha.$$

Líneas de inducción. — Hemos admitido que las líneas de fuerza producidas por un imán están dirigidas del polo norte al polo sur en el exterior del imán; se admite además que estas líneas se cierran por el interior del imán yendo del polo sur al polo norte: en el interior del imán reciben el nombre de *líneas de inducción* (fig. 112).

Si el imán está doblado de modo que los dos polos estén muy próximos entre sí, las líneas de fuerza son

muy cortas y el campo se manifiesta en la región comprendida entre los polos, donde alcanza una gran intensidad (fig. 113). Si el imán es completamente cerrado,

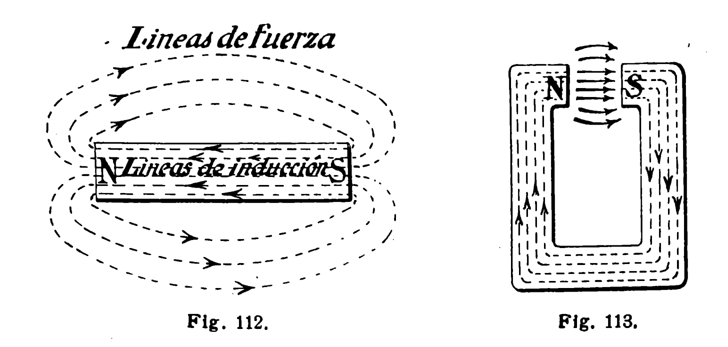


Fig. 112. Fig. 113.

no hay líneas de fuerza, y sólo hay líneas de inducción, no verificándose alrededor del imán ningún fenómeno magnético.

Acción de una barra de hierro sobre un campo magnético. — Permeabilidad. — Cuando se coloca una barra de hierro en un campo magnético se observa que la barra se imana, y el sentido de la imanación es tal que las líneas de fuerza del campo son líneas de inducción del imán creado, donde van del polo sur al polo norte. Al salir el hierro del campo se desimana casi por completo, quedando solamente una ligera imanación que se llama *magnetismo remanente.*

Si en lugar de hierro dulce, se hubiera colocado en el campo una barra de acero, la imanación habría subsistido casi completamente al suprimir el campo, obteniéndose un *imán permanente.*

Supongamos que en un campo uniforme de intensidad $\mathcal{H}$, se coloca una barra de hierro dulce: se observa que el campo queda completamente modificado (figura 114).

1.° La intensidad del campo ha aumentado, y por consiguiente el número de líneas de fuerza que representaba el campo primitivo se ha hecho mayor, pudién-

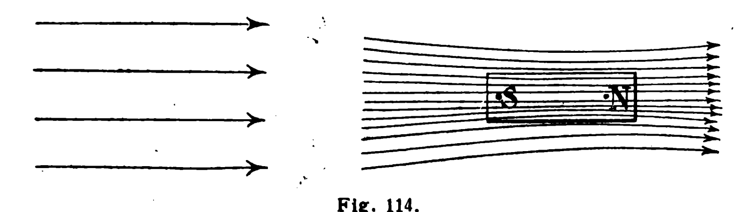


Fig. 114.

dose decir, según las convenciones establecidas anteriormente, que han aparecido nuevas líneas de fuerza en el hierro y su alrededor.

2.° La forma del campo se ha modificado: las líneas de fuerza que eran rectilíneas, ahora son curvas que pasan o tienden a pasar por el hierro. Se expresa este fenómeno diciendo que el hierro es más *permeable*

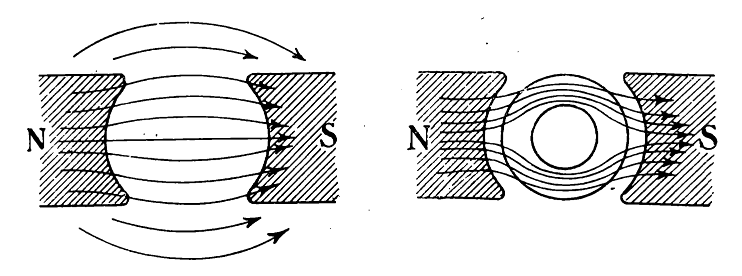


Fig. 115.

que el aire para las líneas de fuerza. Más adelante diremos que el hierro es mejor conductor del flujo magnético que el aire.

Por consiguiente, si se quiere reforzar el campo en una región bastará colocar en esta región un trozo de hierro dulce que concentrará las líneas de fuerza.

La figura 115 representa la concentración que experimentan las líneas de fuerza en el interior de un núcleo de hierro colocado entre los polos de un imán.

Coeficiente de permeabilidad. — Sea un campo uniforme de intensidad $\mathcal{H}$: si se coloca en este campo un trozo de hierro se sabe que en este hierro las líneas de fuerza son más numerosas que las que antes había en el espacio que él ocupa. El campo en el hierro es más grande que $\mathcal{H}$, y se llama *inducción,* que se representa por la letra $\mathcal{B}$. Es decir,

$$\mathcal{B} > \mathcal{H},$$

o sea, que

$$\mathcal{B} = \mu \mathcal{H},$$

siendo μ un número mayor que 1, dependiente del valor del campo $\mathcal{H}$ y de la naturaleza del hierro; este número μ se designa con el nombre de *coeficiente de permeabilidad.*

Si en vez de hierro se colocara en el campo acero o fundición, se produciría el mismo fenómeno; mas

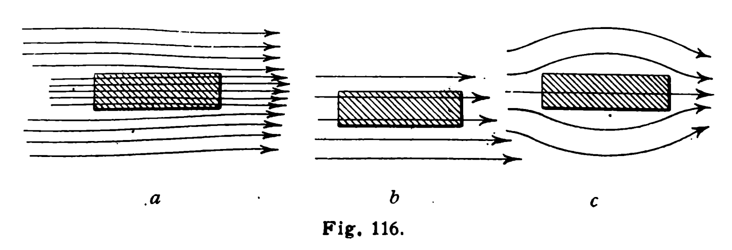


Fig. 116.

para un mismo valor de $\mathcal{H}$, μ sería menor para el acero que para el hierro y menor para la fundición que para el acero.

El hierro, la fundición y el acero son *metales magnéticos* (fig. 116, *a*).

Si en el campo se colocan cuerpos como el cobre, el plomo, madera, etc., se observa que el campo no sufre ninguna modificación, siendo la inducción $\mathcal{B}$ en estos cuerpos igual al campo primitivo $\mathcal{H}$.

$$\mathcal{B} = \mathcal{H}, \quad \text{luego} \quad \mu = 1.$$

Estos cuerpos tienen la misma permeabilidad que el aire y se llaman *no magnéticos* (fig. 116, *b*).

En otros cuerpos, como el bismuto, las líneas de fuerza son menos numerosas que en el aire, o sea que:

$$\mathcal{B} < \mathcal{H} \quad \text{y} \quad \mu < 1.$$

Estos cuerpos son *diamagnéticos* (fig. 116, *c*).

II.—Producción de un campo magnético por una corriente

Solenoide. — Un solenoide está constituído por un conductor arrollado sobre sí mismo de modo que forme un cierto número de espiras circulares regularmente dispuestas unas a continuación de las otras (fig. 117).

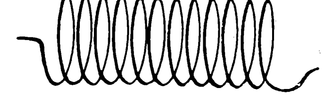


Fig. 117.

La experiencia nos dice que cuando un solenoide es recorrido por una corriente, adquiere todas las propiedades de un imán. Si se suspende de modo que pueda orientarse en todas las direcciones, se observa que al ser recorrido por una corriente, toma la misma dirección que la aguja imanada; por consiguiente, tiene un polo norte y un polo sur.

El polo norte del solenoide es repelido por el polo norte y atraído por el polo sur de un imán o de otro solenoide.

Análogamente a una barra imanada, el solenoide

origina líneas de fuerza que, por convención, van en el exterior del polo norte al polo sur, y en el interior, del polo sur al polo norte (fig. 118).

Un solenoide crea en el exterior y en su interior un campo magnético; en el interior, exceptuando las partes próximas a los extremos, el campo es uniforme si su longitud es muy grande con relación al diámetro.

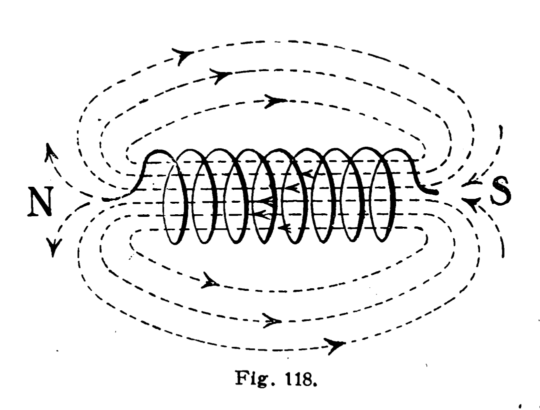


Fig. 118.

Determinemos en el interior del solenoide: 1.°, el sentido del campo; 2.°, su intensidad.

1.° *Sentido del campo.* — El sentido se determina por la regla siguiente:

Se supone un sacacorchos colocado según el eje del solenoide y girando en el sentido de la corriente que

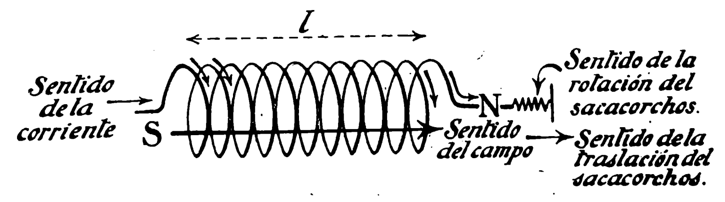


Fig. 119.

pasa por las espiras; el sentido de su traslación es el de las líneas de fuerza y por consiguiente el del campo en el interior del solenoide. Como las líneas de fuerza van en el interior del solenoide del polo sur al polo

norte, se deduce de la regla anterior la posición de los polos del solenoide (fig. 119).

Un conductor único recorrido por una corriente crea en cada uno de sus puntos un campo de líneas de fuerza circulares cuyo plano es perpendicular a la dirección del conductor; el sentido de estas líneas de fuerza es el mismo en que giraría un sacacorchos colocado paralelamente al conductor para que avanzara en el sentido de la corriente (figura 120).

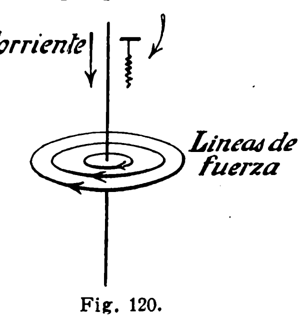


Fig. 120.

2.° *Intensidad del campo.* — Sea N el número de espiras del solenoide, l su longitud en centímetros e I la intensidad en amperes de la corriente que lo recorre.

Se demuestra que el campo en el interior del solenoide tiene por valor:

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi}{10} \frac{NI}{l},$$

o sea:

$$\mathcal{H} = 1{,}25 \frac{NI}{l} \text{ gauss.}$$

El producto NI se designa con el nombre de *amperes-vueltas* del solenoide; $\frac{NI}{l}$ es el número de amperes-vueltas por centímetro, o sea el número de *amperes-vueltas específicos* del solenoide.

Ejemplo. — Sea un solenoide de 25 centímetros de longitud, con 300 espiras, recorrido por una corriente de 5 amperes.

El número de amperes-vueltas de este solenoide es:

$$300 \times 5 = 1500.$$

El número de amperes-vueltas específico es:

$$\frac{1500}{25} = 60.$$

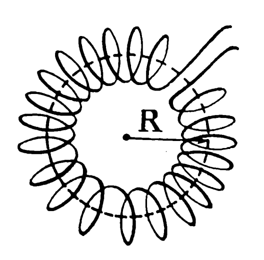


Fig. 121.

El campo en el interior es:

$$\mathcal{H} = 1{,}25 \times 60 = 75 \text{ gauss.}$$

Se ha convenido en decir que en el interior del solenoide hay 75 líneas de fuerza por centímetro cuadrado, es decir, que por cada centímetro cuadrado de la sección recta del solenoide pasan 75 líneas de fuerza.

Caso de un carrete anular. — Sea R el radio de la circunferencia media del anillo, la longitud del solenoide es $2\pi R$ y el campo en el interior es:

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{NI}{2\pi R},$$

o bien:

$$\mathcal{H} = \frac{NI}{5R} \text{ gauss.}$$

Caso de un cuadro o carrete plano. — Si las espiras que constituyen el solenoide están arrolladas sobre sí mismas de modo que forman un carrete plano, este carrete plano al ser recorrido por una corriente se comporta como un imán cuyo eje es perpendicular a su plano y cuyos polos están determinados por la regla del sacacorchos (fig. 122).

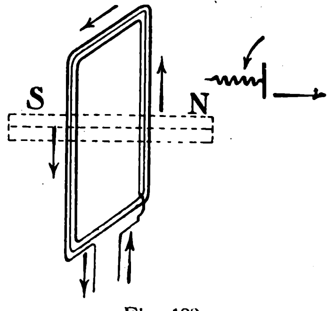


Fig. 122.

Si s es la superficie limitada por las espiras, n el número de éstas e I la corriente que las recorre, se

demuestra que el momento magnético del imán creado por el cuadro, o sea el llamado *momento magnético del cuadro,* tiene por valor $s\,n\,I$.

Solenoide con núcleo de hierro. — Supongamos que se introduce una barra de hierro dulce en el interior de un solenoide; sabemos que el número de líneas de fuerza en el hierro es mucho mayor que el que había antes en el solenoide. Según hemos visto, la inducción $\mathcal{B}$ en el hierro tiene por valor:

$$\mathcal{B} = \mu\,\mathcal{H},$$

siendo μ el coeficiente de permeabilidad del hierro y $\mathcal{H}$ el campo primitivo. Ahora bien, se sabe que el campo tiene por valor:

$$\mathcal{H} = 1{,}25\,\frac{NI}{l},$$

y por consiguiente la inducción en el hierro es:

$$\mathcal{B} = 1{,}25\,\frac{NI}{l}\,\mu \text{ gauss.}$$

Valor del coeficiente de permeabilidad. — El valor del campo $\mathcal{H}$ es fácil deducirlo conociendo N, I, l; y una vez conocido $\mathcal{H}$ puede determinarse por procedimientos especiales el valor de $\mathcal{B}$ correspondiente a cada valor de $\mathcal{H}$. Por consiguiente, se podrán determinar experimentalmente los valores del coeficiente de permeabilidad para diferentes valores del campo, pues sabemos que

$$\mathcal{B} = \mu\,\mathcal{H}, \quad \text{de donde} \quad \mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}.$$

El valor del coeficiente μ depende:

1.° De la naturaleza del metal magnético situado en el campo;

2.° Del valor de este campo, y por consiguiente, de la inducción en el metal.

Este coeficiente es tanto mayor para un mismo metal magnético, cuanto menor es el campo y por consiguiente cuanto menor es la inducción en este metal.

Hay tablas que dan para cada metal y para cada valor de la inducción, el valor del coeficiente de permeabilidad.

HIERRO FORJADO RECOCIDO			HIERRO DULCE			FUNDICIÓN GRIS		
Inducción $\mathcal{B}$	Campo $\mathcal{H}$	Coeficiente μ	Inducción $\mathcal{B}$	Campo $\mathcal{H}$	Coeficiente μ	Inducción $\mathcal{B}$	Campo $\mathcal{H}$	Coeficiente μ
5000	2	2500	5400	2,2	2451	4000	5	800
9000	4	2250	9625	4,5	2137	5000	10,5	500
10000	5	2000	11175	6	1862	6000	21,5	279
11000	6,5	1692	13000	9	1444	7000	42	166
12000	8,5	1412	14650	14	1040	8000	80	100
13000	12	1083	16300	25,1	818	9000	127	71
14000	17	823	17390	38	447	10000	180	53
15000	28,5	526	18140	50	313	11000	292	37
16000	52	308	19200	72	267			
17000	105	161	20000	100	237			
18000	200	90						
19000	350	54						
20000								

Saturación. — En esta tabla vemos que mientras más pequeño es el campo en que se ha colocado el hierro, mayor es el coeficiente de permeabilidad; o sea, que a medida que el campo aumenta, es decir, a medida que se eleva la inducción en el hierro, el efecto del hierro sobre el aumento del número de líneas de fuerza disminuye.

Por ejemplo, cuando el campo es igual a 2 gauss, esto es, cuando está representado por dos líneas de fuerza por centímetro cuadrado, el hierro hace subir

este número a 5000, es decir, hace al campo 2500 veces más grande.

Si el campo no fuera de 2 gauss, sino de 200, el hierro sólo haría este número 90 veces mayor, esto es, lo elevaría a 18000.

Por consiguiente, se ve con toda claridad que el efecto del hierro sobre la multiplicación de las líneas de fuerza va disminuyendo a medida que el campo o la inducción en el hierro va aumentando.

Se expresa este hecho diciendo que el hierro se acerca a su saturación o *se satura* a medida que su inducción aumenta. Se saturaría completamente si no ejerciera ningún efecto sobre el aumento de líneas de fuerza del campo en que se encuentra, y en este caso su coeficiente de permeabilidad sería igual a 1, y se tendría:

$$\mathcal{B} = \mathcal{H}.$$

OBSERVACIÓN.—De aquí se deduce, que cuando el hierro está lejos de su saturación, un pequeño aumento de la corriente en el solenoide que lo rodea produce un gran aumento en su inducción, y que, para un mismo aumento de la corriente, el aumento de la inducción disminuye a medida que el hierro se acerca a su saturación. Supongamos, por ejemplo, un solenoide de 25 centímetros de largo con 100 espiras; si la corriente que lo recorre es de un ampere, el campo es:

$$\mathcal{H} = 1{,}25 \times \frac{100 \times 1}{25} = 5 \text{ gauss.}$$

Cuando se introduce el hierro, alcanza una inducción:

$$\mathcal{B} = 5 \times \mu;$$

las tablas dan para $\mathcal{H} = 5$ $\mu = 2000$, luego sustituyendo, se tiene:

$$\mathcal{R} = 5 \times 2000 = \underline{10000} \text{ gauss.}$$

Si la corriente aumenta en 0,5 ampere, el campo se hace igual a:

$$1{,}25 \times \frac{100 \times 1{,}5}{25} = 7{,}5;$$

el coeficiente de permeabilidad correspondiente es 1550, y la nueva inducción en el hierro será:

$$7{,}5 \times 1550 = \underline{11625};$$

el aumento de inducción en el hierro es:

$$11625 - 10000 = \underline{1625} \text{ gauss.}$$

Supongamos ahora que la corriente sea de 10 amperes, el campo será:

$$1{,}25 \times \frac{100 \times 10}{25} = 50 \text{ gauss;}$$

el coeficiente de permeabilidad correspondiente es $\mu = 320$ y la inducción en el hierro es:

$$50 \times 320 = 16000.$$

Si la corriente aumenta en 0,5 ampere, el campo se convierte en:

$$1{,}25 \times \frac{100 \times 10{,}5}{25} = 52{,}5;$$

el valor de μ es para esta intensidad 308, lo cual da para la inducción:

$$52{,}5 \times 308 = 16170.$$

El aumento ha sido, por lo tanto:

$$16170 - 16000 = 170 \text{ gauss.}$$

Fácilmente se vería que para producir en el segundo caso el mismo aumento de inducción que en el primero, sería preciso que la corriente aumentara en unos 25 amperes.

Si tomamos sobre una recta $O\,\mathcal{H}$ los valores del campo y si por los puntos obtenidos para los diferentes valores se levantan perpendiculares cuyas longitudes representen los valores correspondientes de la inducción, se obtiene una curva de la forma indicada en la figura 123.

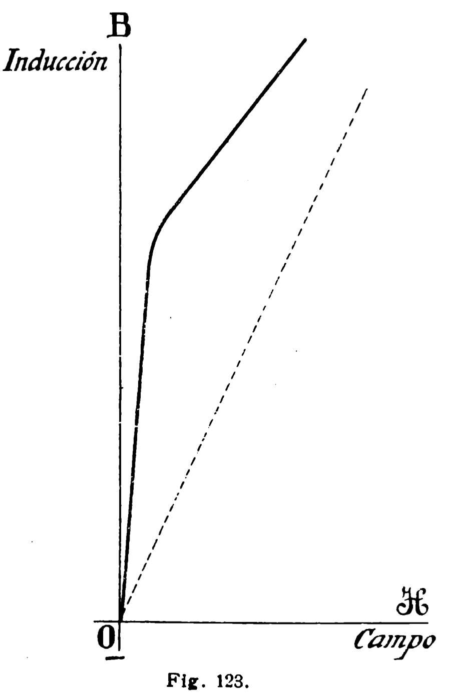


Fig. 123.

Cálculo del número de amperes-vueltas específicos necesario para producir una inducción dada. — Sea $\mathcal{B}$ el valor de esta inducción; se sabe que:

$$\mathcal{B} = 1,25 \frac{NI}{l} \mu;$$

de donde:

$$\frac{NI}{l} = \frac{\mathcal{B}}{1,25\,\mu}.$$

Siendo conocido el valor de $\mathcal{B}$, las tablas dan para el metal magnético de que se trate el valor del coeficiente μ.

Será siempre muy conveniente construir una tabla que dé el valor de este número de amperes-vueltas específicos para los distintos valores de la inducción.

Flujo magnético.—Supongamos en un campo uniforme $\mathcal{H}$ una espira plana y cerrada.

Un cierto número de líneas de fuerza atraviesan

su plano; se dice que la espira está atravesada por un flujo de líneas de fuerza o simplemente por un *flujo magnético* que puede medirse por el número de líneas de fuerza que atraviesan su plano (figura 124).

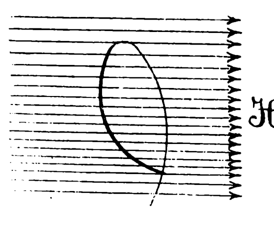


Fig. 124.

Valor del flujo.—1.° *El plano de la espira es perpendicular a la dirección del campo.*—Si el campo es $\mathcal{H}$, el número de líneas de fuerza que atraviesan cada centímetro cuadrado de superficie de un plano perpendicular a la dirección del campo es, por definición, $\mathcal{H}$.

Si S es la superficie limitada por la espira, y que llamaremos superficie de la espira, expresada en centímetros cuadrados, el número de líneas de fuerza, y por consiguiente el flujo a través de la superficie de la espira, es:

$$\Phi = \mathcal{H} \times S.$$

La unidad de flujo es el *maxwell.*

Si $\mathcal{H} = 1$ y $S = 1$, se tiene $\Phi = 1$; es decir, que el maxwell o unidad de flujo es el flujo a través de una superficie de un centímetro cuadrado cuyo plano es perpendicular a la dirección de un campo de un gauss; esta superficie es atravesada por una sola línea de fuerza.

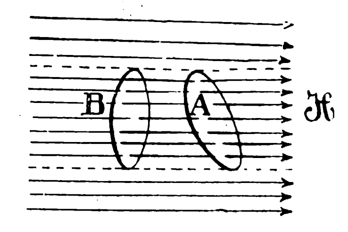


Fig. 125.

2.° *El plano de la espira no es perpendicular a la dirección del campo.*—Sea A la espira considerada (fig. 125); las líneas de fuerza que atraviesan su plano están contenidas en un

cilindro cuya base es la espira y cuyas generatrices son paralelas a la dirección del campo; el número de estas líneas de fuerza es el mismo de las que atraviesan la sección recta *B* del cilindro. Luego el flujo a través de la espira *A* es igual al flujo a través de la espira *B*, es decir, que si S' es la superficie de *B*, este flujo es:

$$\Phi = \mathcal{H} \times S'.$$

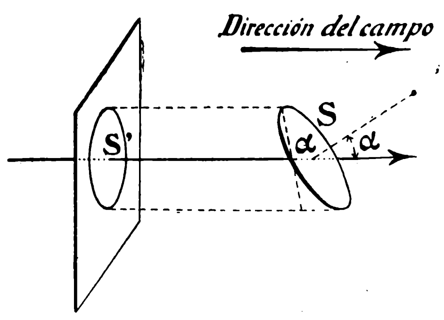


Fig. 126.

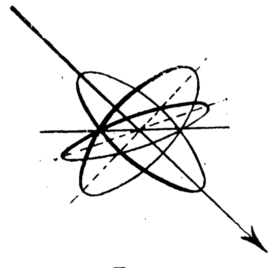
Por consiguiente, el flujo a través de una espira situada en un campo uniforme tiene por valor el producto del número que mide el campo por el número que mide la superficie de la proyección de la espira sobre un plano perpendicular a la dirección del campo (fig. 126).

Supongamos una espira de superficie S en un campo uniforme $\mathcal{H}$, y cuyo plano sea paralelo a la dirección del campo; ninguna línea de fuerza corta al plano de la espira, es decir, que el flujo a través de la espira es nulo.

Si se hace girar esta espira alrededor de un eje perpendicular a la dirección del campo situado en el plano de la espira, se ve que el flujo aumenta progresivamente de 0 a $\mathcal{H}S$, valor que alcanza cuando el ángulo descrito ha sido de 90°; cuando la espira gira de modo que su plano forma con la dirección del campo un ángulo comprendido entre 90° y 180°, el flujo disminuye desde $\mathcal{H}S$ hasta 0 (fig. 127).

Si continúa girando la espira en el mismo sentido, las líneas de fuerza cortan a su plano por la otra cara y

el flujo varía de 0 a $\mathcal{H}S$, y después de $\mathcal{H}S$ a 0, cuando el ángulo crece de 180° a tres rectos ó 270°, y después de 270° a 360°.


Fig. 127.

El valor del flujo es una magnitud algebraica afectada del signo + cuando las líneas de fuerza entran por una cara de la espira tomada arbitrariamente, y del signo — cuando penetran por la cara opuesta.

Por consiguiente, cuando la espira considerada, colocada al principio paralelamente a la dirección del campo, gira 360°, el flujo a través de esta espira varía del modo siguiente:

Ángulo del plano de la espira con el campo. . .	0°		90°		180°		270°		360°
Flujo.	0	crece	$\mathcal{H}S$	decrece	0	decrece	$-\mathcal{H}S$	crece	0

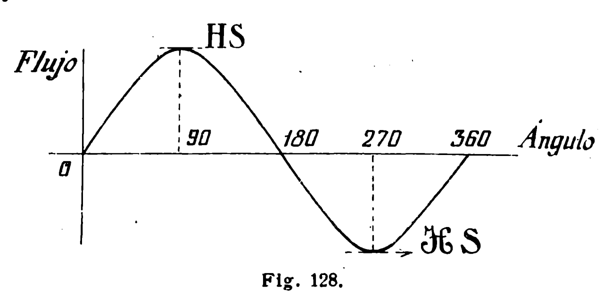


Fig. 128.

Estas variaciones se representan por la curva de la figura 128.

Observación. — Si α es el ángulo que forma el plano de la espira con el plano perpendicular a la dirección del campo, se sabe que:

$$S' = S \cos \alpha,$$

luego el flujo tiene por valor:

$$\Phi = \mathcal{H} \times S \cos \alpha,$$

que también puede escribirse:

$$\Phi = S \times \mathcal{H} \cos \alpha.$$

Si el segmento de recta OM representa en dirección y magnitud, en determinada escala, el valor del campo $\mathcal{H}$, la proyección de OM sobre una dirección perpendicular al plano de la espira, OP, tiene una longitud cuyo valor es $\mathcal{H} \cos \alpha$ (fig. 129). Por consiguiente, el flujo a través de una espira tiene por valor el producto del número que mide en centímetros cuadrados la superficie de la espira por el número que mide la proyección del campo (representada en dirección y magnitud por un segmento de recta) sobre una dirección perpendicular al plano de la espira.

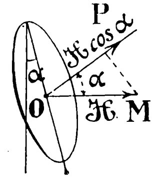


Fig. 129.

Fuerza magnetomotriz. — Reluctancia. — Consideremos un núcleo de hierro rodeado por un solenoide (figura 130); sabemos que la inducción en el hierro tiene por valor:

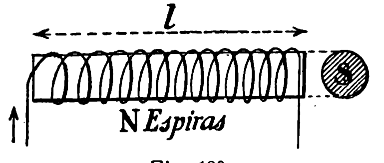


Fig. 130.

$$\mathcal{B} = 1{,}25 \frac{NI}{l} \mu.$$

Supongamos una espira que tenga la misma superficie S que la sección recta del núcleo de hierro y que esté rodeando a éste: a través de esta espira pasará un flujo Φ, cuyo valor es $\mathcal{B}\, S$, o sea:

$$\Phi = 1{,}25 \frac{NI}{l} \mu S.$$

El número de líneas de fuerza que atraviesan esta espira y por consiguiente el núcleo de hierro es $1,25 \frac{NI}{l} \mu S$. Se dice que el flujo en el hierro es

$$\Phi = 1,25 \frac{NI}{l} \mu S.$$

Si se dobla el hierro y el solenoide de modo que formen un circuito cerrado sobre sí mismo, el flujo conservará el mismo valor. El hierro constituye así un circuito magnético (fig. 131).

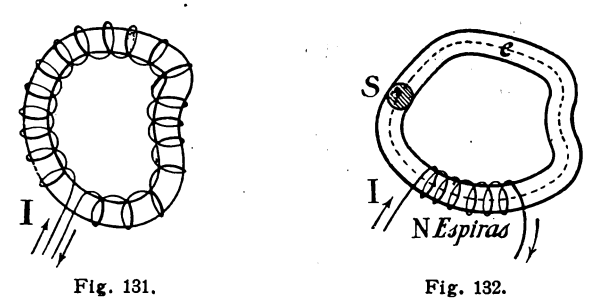


Fig. 131. Fig. 132.

Supongamos que acercamos las espiras del solenoide unas a otras hasta ocupar una pequeña parte del circuito magnético; el flujo no cambiará de valor (figura 132).

Por consiguiente, si sobre una parte de un circuito magnético formado por un solo metal, de longitud media l y de sección constante S en toda su longitud, se arrollan N espiras recorridas por una corriente I, este circuito estará atravesado por un flujo cuyo valor es:

$$\Phi = 1,25 \frac{NI}{l} \mu S.$$

Esta expresión puede escribirse de este otro modo:

$$\Phi = \frac{1,25\, NI}{\frac{l}{\mu S}}.$$

La magnitud correspondiente al valor 1,25 NI se llama *fuerza magnetomotriz* y se representa por $\mathcal{E}$.

La magnitud cuyo valor es $\frac{l}{\mu S}$ se llama resistencia magnética o *reluctancia* del circuito magnético y se representa por $\mathcal{R}$.

De este modo, el flujo viene expresado en la forma siguiente:

$$\Phi = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{R}}. \tag{1}$$

Esta relación tiene la misma forma que la que expresa la ley de Ohm:

$$I = \frac{E}{R}.$$

Estableciendo un paralelo entre los fenómenos magnéticos y eléctricos expresados en estas dos relaciones, vemos que hay analogía entre:

El flujo magnético y la corriente eléctrica;

La fuerza magnetomotriz y la fuerza electromotriz;

La reluctancia y la resistencia.

Igualmente hay analogía entre las expresiones que dan los valores de la reluctancia y de la resistencia:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}, \qquad R = \frac{l}{cS},$$

siendo μ el coeficiente de permeabilidad y c la conductibilidad del metal que forma el conductor eléctrico $\left(c = \frac{1}{a}\right.$, siendo a la resistividad de este metal).

Esta analogía es incompleta, pues c tiene un valor dependiente únicamente de la naturaleza del metal y su temperatura y por consiguiente independiente de la corriente I; por el contrario, μ varía con el flujo y sus variaciones son considerables.

Circuito magnético.— Así como varios conductores colocados unos a continuación de otros constituyen un circuito eléctrico, del mismo modo varios cuerpos *magnéticos* así dispuestos constituyen un circuito magnético.

La diferencia esencial entre estos dos circuitos estriba en que hay aisladores eléctricos, o sea cuerpos como el aire, que no pudiendo ser atravesados por una corriente no pueden formar parte de un circuito eléctrico, y en cambio no existen aisladores magnéticos, pues el aire mismo puede ser atravesado por un flujo, y por lo tanto puede formar parte de un circuito magnético.

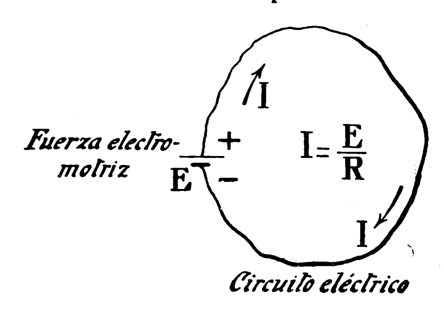


Fig. 133.

En un circuito eléctrico, la corriente es la misma en todos los puntos de los conductores en serie que lo componen, no pudiendo haber por el aire ninguna derivación entre dos puntos cualesquiera del circuito. Por el contrario, las líneas de fuerza pueden desviarse entre dos puntos de un mismo circuito compuesto de sustancias magnéticas, de modo que el flujo no es constante en todas las partes de este circuito.

Para que pase una corriente por un circuito eléctrico (fig. 133) se aplica entre dos de sus puntos una fuerza electromotriz E, producida, por ejemplo, por una pila; si R es la resistencia del circuito, resultará una corriente:

$$I = \frac{E}{R}.$$

Del mismo modo, para hacer pasar un flujo por un

circuito magnético se aplicará a este circuito una fuerza magnetomotriz, obtenida arrollando sobre una de sus partes un cierto número N de espiras, por las que se hará pasar una corriente I (fig. 134). Bajo la influencia de la fuerza magnetomotriz cuyo valor es $\mathcal{E} = 1{,}25\ NI$, un flujo atraviesa el circuito. Generalizando la fórmula que hemos establecido anteriormente, diremos que el valor de este flujo es:

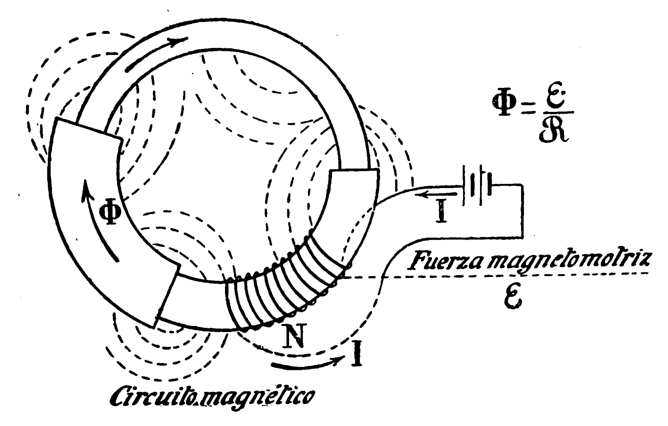


Fig. 134.

$$\Phi = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{R}},$$

siendo $\mathcal{R}$ la reluctancia del circuito magnético. Supongamos que el flujo es constante en todas las partes del circuito y que, por consiguiente, no hay derivaciones a través del aire.

Cálculo del número de amperes-vueltas necesario para producir en una parte de un circuito magnético dado, una inducción dada.—1.° *El circuito está formado por un solo metal de sección constante en toda*

su longitud y se admite que no hay ninguna derivación magnética.—Sea $\mathcal{B}$ la inducción dada: las tablas nos dan, para el metal que forma el circuito, el valor del coeficiente de permeabilidad μ. Sean l y S la longitud en centímetros y la sección en centímetros cuadrados del circuito: su reluctancia es:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S};$$

además se sabe que el flujo en el circuito tiene por valor:

$$\Phi = \mathcal{B} S.$$

Sea NI el número de amperes-vueltas necesario para producir la inducción $\mathcal{B}$ y por consiguiente el flujo Φ. La fuerza magnetomotriz es 1,25 NI, y se tiene:

$$\Phi = \frac{1{,}25\,NI}{\mathcal{R}},$$

o sea:

$$\mathcal{B} S = \frac{1{,}25\,NI}{\frac{l}{\mu S}},$$

o bien,

$$\mathcal{B} S = \frac{1{,}25\,NI \times \mu S}{l},$$

y dividiendo por S,

$$\mathcal{B} = \frac{1{,}25\,NI\mu}{l};$$

de donde:

$$NI = \frac{\mathcal{B} l}{1{,}25\,\mu}.$$

2.° *El circuito está formado de varias partes de naturaleza y sección diferentes y se admite que no hay ninguna derivación del flujo.* — Sea un circuito magnético compuesto de tres sustancias (1), (2), (3) formando tres partes que tienen respectivamente por longitudes y por secciones, l_1, S_1; l_2, S_2; l_3, S_3. Queremos producir en la primera parte una inducción dada $\mathcal{B}_1$ (fig. 135).

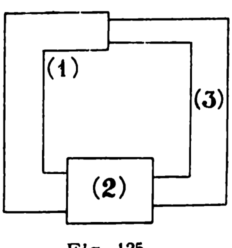


Fig. 135.

Como hemos admitido que el flujo se conserva constante en todo el circuito, tendrá en cada parte por valor $\mathcal{B}_1 S_1$; luego en las partes (2) y (3) habrá inducciones $\mathcal{B}_2$ y $\mathcal{B}_3$ tales, que los flujos $\mathcal{B}_2$ S_2 y $\mathcal{B}_3$ S_3 sean iguales a $\mathcal{B}_1 S_1$. Se tendrá por consiguiente:

$$\mathcal{B}_2 S_2 = \mathcal{B}_1 S_1,$$

de donde:

$$\mathcal{B}_2 = \mathcal{B}_1 \times \frac{S_1}{S_2}.$$

Análogamente:

$$\mathcal{B}_3 S_3 = \mathcal{B}_1 S_1,$$

de donde:

$$\mathcal{B}_3 = \mathcal{B}_1 \times \frac{S_1}{S_3}.$$

Calculadas las inducciones $\mathcal{B}_2$ y $\mathcal{B}_3$, se conocen los valores de los coeficientes de permeabilidad μ_1, μ_2, y μ_3 correspondientes a las inducciones conocidas $\mathcal{B}_1$ $\mathcal{B}_2$ y $\mathcal{B}_3$ en las sustancias que constituyen las partes (1), (2) y (3) del circuito. La reluctancia del circuito tiene por valor:

$$\mathcal{R} = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_3}{\mu_3 S_3}.$$

Sea NI el número de amperes-vueltas buscado; la fuerza magnetomotriz aplicada al circuito es:

$$\mathcal{E} = 1{,}25\, NI,$$

y el flujo producido:

$$\Phi = \mathcal{B}_1 S_1;$$

pero

$$\Phi = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{R}},$$

o sea

$$\mathcal{B}_1 S_1 = \frac{1{,}25\, NI}{\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_3}{\mu_3 S_3}},$$

de donde se deduce:

$$NI = \frac{\mathcal{B}_1 S_1}{1{,}25}\left(\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_3}{\mu_3 S_3}\right).$$

3.° *El circuito está formado de varias partes de naturalezas y secciones diferentes y el flujo no es el mismo en cada parte.*—Está demostrado que:

El número que mide la fuerza electromotriz necesaria para producir en las diferentes partes de un circuito magnético flujos dados, es igual a la suma de los productos del número que mide la reluctancia de cada una de estas partes por el número que mide el flujo que la atraviesa.

Sean Φ_1, Φ_2 y Φ_3 los flujos en cada una de estas partes cuyas reluctancias son $\mathcal{R}_1$, $\mathcal{R}_2$ y $\mathcal{R}_3$; la fuerza magnetomotriz necesaria para producir estos flujos tiene por valor

$$\mathcal{E} = \mathcal{R}_1 \Phi_1 + \mathcal{R}_2 \Phi_2 + \mathcal{R}_3 \Phi_3.$$

Esta relación puede escribirse en la forma general:

$$\mathcal{E} = \Sigma\, \mathcal{R}\Phi.$$

Supongamos que se dan las inducciones $\mathcal{B}_1$, $\mathcal{B}_2$ y $\mathcal{B}_3$ que se quieren obtener en las partes (1), (2) y (3) de un circuito; las tablas dan los coeficientes de permeabilidad correspondientes μ_1, μ_2 y μ_3. Si l_1, l_2, l_3 y S_1, S_2, S_3 son las longitudes y las secciones de cada una de estas partes, los flujos de ellas son:

$$\Phi_1 = \mathcal{B}_1 S_1, \qquad \Phi_2 = \mathcal{B}_2 S_2, \qquad \Phi_3 = \mathcal{B}_3 S_3.$$

Las reluctancias serán:

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_1 S_1}, \qquad \mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_2 S_2}, \qquad \mathcal{R}_3 = \frac{l_3}{\mu_3 S_3}.$$

La fuerza magnetomotriz necesaria para obtener las inducciones dadas es $1{,}25\, NI$, de modo que se tenga:

$$1{,}25\, NI = \mathcal{B}_1 S_1 \times \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \mathcal{B}_2 S_2 \times \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \mathcal{B}_3 S_3 \times \frac{l_3}{\mu_3 S_3}$$

o bien,

$$1{,}25\, NI = \frac{\mathcal{B}_1 l_1}{\mu_1} + \frac{\mathcal{B}_2 l_2}{\mu_2} + \frac{\mathcal{B}_3 l_3}{\mu_3},$$

de donde

$$NI = \frac{\mathcal{B}_1}{1{,}25\, \mu_1} \times l_1 + \frac{\mathcal{B}_2}{1{,}25\, \mu_2} \times l_2 + \frac{\mathcal{B}_3}{1{,}25\, \mu_3} \times l_3.$$

Ahora bien, hemos visto (pág. 177) que $\frac{\mathcal{B}}{1{,}25\, \mu}$ es el número de amperes-vueltas específicos necesario para producir la inducción $\mathcal{B}$. Por consiguiente:

El número de amperes-vueltas necesario para producir en las diferentes partes de un circuito magnético, inducciones dadas $\mathcal{B}_1$, $\mathcal{B}_2$, $\mathcal{B}_3$, es igual a la suma de los productos del número que mide la longitud de cada una de estas partes por el número de amperes-vueltas específicos necesario para producir la induc-

ción correspondiente en el metal de que está constituída.

Observación. — Sucede con frecuencia que una de las partes que componen un circuito magnético está formada por una capa de aire, que recibe el nombre de *entrehierro* (figura 136). El entrehierro es la parte del circuito de mayor reluctancia, por ser su coeficiente de permeabilidad igual a 1, mientras que en las otras partes es mucho más grande. Un cierto número de líneas de fuerza se desvían entre las dos secciones que limitan el entrehierro, de modo que el flujo que atraviesa el entrehierro es menor que en el resto del circuito.

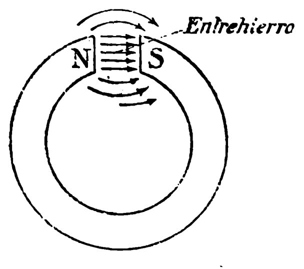


Fig. 136.

Si Φ es el flujo en las partes magnéticas del circuito, el flujo en el entrehierro será:

$$\Phi' < \Phi.$$

Esta relación puede escribirse de este modo:

$$\Phi = K \Phi',$$

siendo K un número mayor que la unidad. Este número K se llama *coeficiente de pérdida de flujo*, y es el número por el que hay que multiplicar el flujo en el entrehierro para obtener el valor del flujo en el resto del circuito.

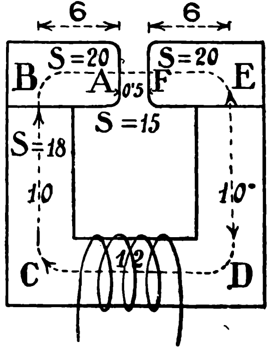


Fig. 137.

Ejemplo.—*Se quiere producir en el entrehierro* AF,

de 0,5 *cm. de longitud, de un circuito* ABCDEF, *una inducción de* 8000 *gauss. La sección en el entrehierro es de* 15 *centímetros cuadrados. El circuito es de hierro forjado; las partes* AB *y* FE *tienen* 6 *centímetros de longitud y* 20 *centímetros cuadrados de sección. La parte* BCDE *tiene* 32 *centímetros de longitud y* 18 *centímetros cuadrados de sección. Calcular el número de amperes-vueltas, sabiendo que el coeficiente de pérdida de flujo es* K=1,4 (fig. 137).

Teniendo que ser la inducción en el entrehierro de 8000 gauss, el flujo será:

$$\Phi = 8000 \times 15 = 120000.$$

Siendo K = 1,4, el flujo en el resto del circuito es:

$$120000 \times 1,4 = 168000.$$

La inducción en las partes *AB* y *FE* es por consiguiente:

$$\mathscr{B}_1 = \frac{168\,000}{20} = 8\,400.$$

Para esta inducción corresponde en el hierro forjado un coeficiente de permeabilidad $\mu_1 = 2300$.

En la parte *BCDE* la inducción es:

$$\mathscr{B}_2 = \frac{168\,000}{18} = 9\,300,$$

y las tablas dan para el coeficiente de permeabilidad correspondiente:

$$\mu_2 = 2\,200.$$

Las reluctancias de las tres partes del circuito son:

$\frac{0,5}{15}$ para el entrehierro $(l = 0,5, \quad \mu = 1, \quad S = 15)$;

$$\frac{12}{2\,300 \times 20} \text{ (partes } AB \text{ y } FE\text{)};$$

$$\frac{32}{2\,200 \times 18} \text{ (parte } BCDE\text{)}.$$

El número de amperes-vueltas necesario para obtener las inducciones es NI, tal que se tenga:

$$1{,}25\, NI = 120000 \times \frac{0{,}5}{15} + 168\,000 \left(\frac{12}{2\,300 \times 20} + \frac{32}{2\,200 \times 18} \right),$$

de donde:

$$NI = \frac{120\,000}{1{,}25} \times \frac{0{,}5}{15} + \frac{168\,000}{1{,}25} \left(\frac{12}{2\,300 \times 20} + \frac{32}{2\,200 \times 18} \right),$$

y efectuando operaciones,

$$NI = 3200 + 150 = 3350.$$

Observación.—De los 3350 amperes-vueltas necesarios para producir las inducciones dadas se ve que la mayor parte, o sea 3200, se han empleado en atravesar el entrehierro por el flujo, mientras que para el resto del circuito ha bastado con 150 amperes-vueltas.

Histeresis. — Cuando se somete el hierro a variaciones de imanación, se desarrollan en su interior fuerzas que tienden a oponerse a estas variaciones, y por consiguiente, para producirlas es preciso efectuar un trabajo que aparece bajo forma de calor en la masa del hierro.

Este fenómeno se llama *histeresis*. Para estudiar la histeresis se rodea el hierro de un solenoide por el cual se hace pasar una corriente variable en magnitud y dirección; se mide para los distintos valores de la corriente los valores correspondientes de la inducción en el hierro, de modo que se pueden estudiar las variaciones de la imanación en el hierro cuando la causa de esta imanación, es decir, el campo o la corriente magnetizante, varía entre dos valores extremos.

Se hace variar la corriente, por ejemplo de 0 a

10 amperes y después de 10 a 0; entonces se cambia el sentido de la corriente y se hace variar de nuevo de 0 a 10 amperes y después de 10 a 0; se cambia otra vez el sentido y se hace subir la corriente hasta 10 amperes (figura 138).

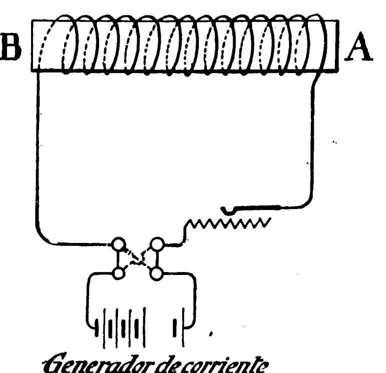


Fig. 138.

Si convenimos en considerar la corriente como positiva cuando marcha en el primer sentido y como negativa cuando marcha en sentido contrario, podemos decir que la corriente varía entre + 10 y — 10 amperes.

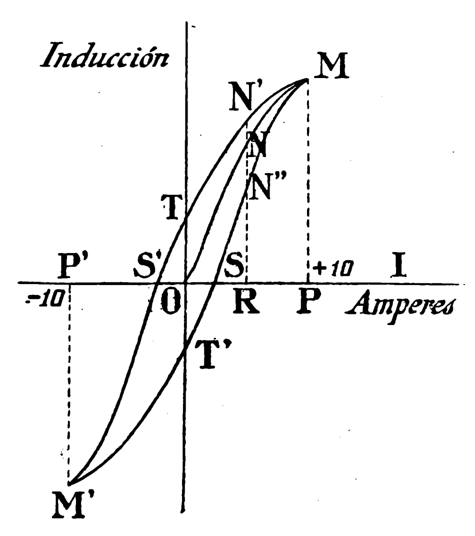


Fig. 139.

Sobre una línea horizontal (figura 139) se toman longitudes proporcionales a los valores de la corriente, hacia la derecha cuando es positiva y hacia la izquierda cuando es negativa; por los puntos resultantes se levantan perpendiculares a estas líneas sobre las cuales se toman longitudes propor-

cionales a las inducciones correspondientes determinadas por una medición. Estas longitudes se toman hacia arriba cuando la inducción tenga un determinado sentido que consideramos como positivo, por ejemplo, cuando haya un polo norte en A y un polo sur en B (fig. 138), y hacia abajo cuando la inducción sea negativa, es decir, cuando haya un polo sur en A y un polo norte en B.

Los resultados son los siguientes: Si el hierro no ha sido nunca imanado y la corriente crece de 0 a 10 amperes, la imanación crece de un modo continuo de 0 hasta un cierto valor representado por MP siguiendo la curva ONM. Cuando la corriente disminuye hasta 0, la inducción disminuye al mismo tiempo, pero no toma en este período decreciente de la corriente los mismos valores que había tomado en el período creciente. Por ejemplo, para un valor de la corriente representado por OR, la inducción tiene un valor cuya magnitud es RN durante el período creciente y RN' durante el período decreciente.

La inducción va disminuyendo según la curva $MN'T$, y cuando la corriente llega a ser cero la inducción tiene un cierto valor representado por OT, que es lo que se llama *magnetismo remanente*.

Si se cambia el sentido de la corriente, la imanación conserva el mismo sentido y es de signo contrario a la que tiende a producir la corriente. La inducción no se anula hasta que la corriente no ha tomado un valor en este sentido representado por OS', que es lo que se llama *fuerza coercitiva*.

A partir de este valor, la corriente sigue aumentando, la imanación cambia de sentido y aumenta en este nuevo sentido hasta el valor representado por P' M' correspondiente a una intensidad $I = 10$ amperes, siguiendo la curva $S'M'$.

La intensidad disminuye a continuación hasta 0 y la imanación también disminuye siguiendo la curva *M' T'* hasta un valor representado por *O T'*, que es el magnetismo remanente.

La corriente cambia entonces de sentido y el magnetismo remanente se anula para un valor de esta corriente representado por *O S*; después aumenta la corriente hasta 10 amperes y la imanación crece hasta *MP* siguiendo la curva *SN'' M*.

En resumen, cuando la corriente varía entre los valores extremos + 10 y — 10 amperes, la inducción en el hierro sufre variaciones representadas por la curva cerrada *MS' M' SM*. Esta curva se llama *lazo* o *ciclo de histeresis*.

Cuando un hierro se somete a inducciones que varían de un modo continuo entre dos límites extremos, se dice que recorre un lazo o ciclo de histeresis.

Se puede hacer recorrer a una barra de hierro ciclos de histeresis haciéndola girar en un campo magnético *NS* alrededor de un eje *O* perpendicular a las líneas de fuerza del campo. Esta barra de hierro recorre un ciclo de histeresis en cada rotación completa alrededor del eje (figura 140).

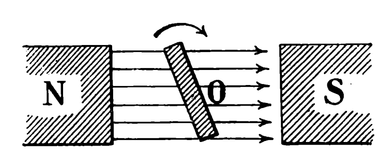


Fig. 140.

De la misma manera, cuando un anillo de hierro cuyo eje es perpendicular a la dirección de las líneas de fuerza de un campo, gira alrededor de este eje, recorre un ciclo de histeresis por revolución. En efecto, consideremos una porción *A B* de este anillo (fig. 141); las líneas de fuerza entran por *A*, dependiendo el sentido de la imanación en *A B* de la dirección de las líneas de fuerza que la atraviesan. Se ve que después de

media rotación del anillo la misma porción $A\ B$ es atravesada por líneas de fuerza que entran por B, es decir, que tienen dirección contraria a las que la atravesaban en la primera posición. Después de otra media rotación, la imanación toma su primitivo valor en magnitud y signo.

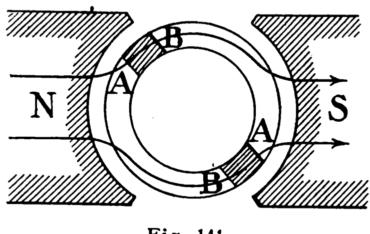


Fig. 141.

Energía absorbida por la histeresis. — Se demuestra que cuando un hierro recorre un ciclo de histeresis absorbe una cantidad de energía que aparece en su masa bajo la forma de calor, y que esta energía es proporcional a la superficie envuelta por la curva de histeresis trazada del modo indicado, al volumen de la masa de hierro y al número de ciclos recorridos.

Por consiguiente, si la superficie de esta curva es S centímetros cuadrados y el volumen del hierro es V centímetros cúbicos, cuando el hierro ha recorrido N ciclos, la energía absorbida transformada en calor es:

$$W = KSVN.$$

Si N es el número de ciclos por segundo, la expresión anterior mide la energía absorbida por segundo, es decir, la potencia absorbida por histeresis.

Fórmula de Steinmetz. — En la práctica se emplea para determinar la potencia absorbida por el fenómeno de histeresis, la fórmula empírica siguiente, deducida y comprobada experimentalmente por Steinmetz:

$$W = \frac{\eta V \mathcal{B}^{1,6} N}{10^7} \text{ watts,}$$

en que η es un coeficiente que depende de la naturaleza del metal y que puede determinarse experimen-

talmente por medio de un aparato llamado *histeresímetro;* V es el volumen en centímetros cúbicos de la masa de metal; $\mathcal{B}$ es en gauss el valor *máximo* de la inducción; N es el número de ciclos recorridos por segundo.

El orden de magnitud del coeficiente η para los distintos metales magnéticos está dado en la tabla siguiente:

Plancha de hierro dulce	0,0024	Acero fundido	0,012
Acero dulce fundido	0,004	Fundición	0,0133
» de máquinas	0,008	Acero fundido templado	0,0250

OBSERVACIÓN. — Cuando la imanación es producida por una corriente que recorre un solenoide alrededor del hierro, la energía absorbida por histeresis es facilitada por el generador de la corriente. Sea R la resistencia del solenoide; cuando la corriente que lo recorre es I, la potencia absorbida es RI^2; pero si la corriente sufre alguna variación, mientras dura esta variación el hierro absorbe una energía W como consecuencia de la variación de su imanación, siendo el generador de corriente quien proporciona esta energía durante el período variable.

Si las variaciones de imanación son producidas por el movimiento de una masa magnética en un campo, la energía absorbida por histeresis es proporcionada por la máquina que mueve la masa magnética.

Electroimán. — Fuerza de atracción. — Un electroimán está formado por un núcleo de hierro ordinariamente en forma de U sobre el cual se arrolla un alambre en forma de solenoide, por el que puede pasar una corriente.

Bajo la influencia de esta corriente, el hierro se imana, creándose en sus extremos un polo norte y un polo sur. Si se coloca frente a estos polos una barra

de hierro dulce, llamada armadura, ésta se imana de modo que sus polos caen enfrente de los polos de nombre contrario del electroimán, resultando una atracción, cuyo efecto sobre la armadura hace que ésta se ponga en contacto con los extremos del electroimán.

La fuerza de atracción ejercida sobre la armadura se llama *fuerza de atracción* del electroimán.

Se demuestra que esta fuerza tiene por valor:

$$F = \frac{1}{981} \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi} \text{ gramos-peso,}$$

siendo $\mathcal{B}$ la inducción en gauss, S la superficie total de contacto sobre el electroimán y la armadura, expresada en centímetros cuadrados. Si N es el número de espiras del solenoide, I la corriente, S la sección del hierro y l la longitud del circuito magnético, es decir, la longitud de una línea de inducción media, se sabe que:

$$\mathcal{B} = 1{,}25 \frac{NI}{l} \mu;$$

y la fuerza de atracción tiene por valor:

$$F = \frac{1}{981} \cdot \frac{1{,}25^2 N^2 I^2 \mu^2}{8\pi \times l^2} \times S;$$

$$\text{y como} \qquad 1{,}15 = \frac{4\pi}{10},$$

$$F = \frac{16\pi^2 N^2 I^2 \mu^2 S}{981 \times 100 \times 8\pi l^2} = \frac{\pi N^2 I^2 \mu^2 S}{981 \times 50 \times l^2} \text{ gramos.}$$

En esta fórmula vemos que la fuerza de atracción es tanto más grande cuanto mayor es la sección S del hierro y cuanto menor es la longitud l del circuito magnético.

Por esta causa se da al electroimán una forma tal, que tenga mucha sección y poca longitud.

Cálculo de un electroimán. — Calculemos las dimensiones de un electroimán de fuerza de atracción dada F. Se empieza por hacer un croquis de la forma que ha de tener el electroimán, según el uso a que se destine. Todas las dimensiones quedarán determinadas cuando se conozca la escala del dibujo, bastando para ello calcular una de estas dimensiones.

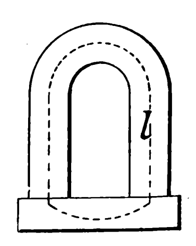


Fig. 142.

Se toma la inducción a que se quiere someter el hierro, que es generalmente de 15000 a 18000 gauss; no se debe tomar un valor superior porque se acercaría demasiado a la saturación y sería preciso aumentar considerablemente el número de amperes-vueltas para un incremento relativamente pequeño de la inducción.

De la relación:

$$F = \frac{1}{981} \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi} \text{ gramos}$$

se deduce:

$$S = \frac{F \times 981 \times 8\pi}{\mathcal{B}^2} \text{ centímetros cuadrados.}$$

EJEMPLO. — Supongamos que hay que construir un electroimán que pueda sostener un peso de 200 kilogramos con una corriente de un ampere.

Tomemos por ejemplo un hierro de sección rectangular, de la forma indicada en la figura 143.

Según el croquis, las dimensiones relativas son:

$$AD = BC = \frac{3}{2} AB.$$

La sección recta del hierro es $MNPQ$, estando sus lados en la relación:

$$MN = \frac{3\,MP}{2},$$

y siendo

$$AD = 3\,MN.$$

Si tomamos como valor de la inducción que ha de producirse en el hierro, $\mathcal{B} = 15000$, la superficie de contacto entre el electroimán y su armadura vendrá dada por la relación:

$$S = \frac{200000 \times 981 \times 8 \times 3{,}14}{15000^2} = 21{,}9 \text{ cm}^2.$$

La sección del hierro será igual a $\frac{21{,}9}{2}$, o sea a 11 centímetros cuadrados; pero como

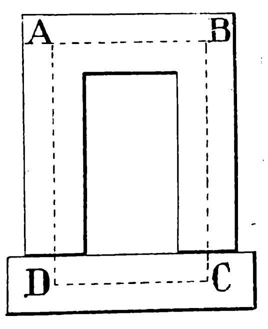


Fig. 143.

$$MP = MN \times \frac{2}{3}, \text{ se tiene:}$$

$$MN \times MN \times \frac{2}{3} = 11,$$

de donde:

$$MN^2 = \frac{3}{2} \times 11 = 16{,}5;$$

luego:

$$MN = \sqrt{16{,}5} = 4{,}06.$$

Sustituyendo este valor en AD, tenemos:

$$AD = 3\,MN = 3 \times 4{,}06 = 12{,}18$$

y

$$AB = \frac{2\,AD}{3} = \frac{2 \times 12{,}18}{3} = 8{,}12.$$

La longitud de la línea de fuerza media es:

$$2(AD+AB)=2(12{,}18+8{,}12)=40{,}60 \text{ cm}.$$

Hemos tomado para la inducción en el hierro el valor $\mathcal{B}$ = 15000 gauss, que corresponde a un coeficiente de permeabilidad $\mu = 525$.

La reluctancia del circuito magnético es por consiguiente:

$$\mathcal{R}=\frac{l}{\mu\, S}=\frac{40{,}60}{525\times 11}.$$

El número de amperes-vueltas necesario para producir esta inducción es NI, de modo que satisfaga a la condición:

$$\Phi=\frac{1{,}25\, NI}{\mathcal{R}}, \quad \text{o sea} \quad \mathcal{B}\, S=\frac{1{,}25\, NI}{\mathcal{R}},$$

y sustituyendo valores:

$$15000\times 11=\frac{1{,}25\, NI}{\frac{40{,}60}{11\times 525}},$$

o sea:

$$15000\times 11=\frac{1{,}25\, NI\times 11\times 525}{40{,}60},$$

de donde:

$$NI=\frac{15000\times 11\times 40{,}60}{1{,}25\times 525\times 11},$$

o sea:

$$NI=\frac{15000\times 40{,}60}{1{,}25\times 525}=928,$$

es decir, que si se arrollan dos carretes habrá 464 amperes-vueltas por carrete.

Este número es insuficiente, porque por muy bien ajustados que estén la armadura y los extremos del

electroimán, siempre hay entre ellos una capa de aire que aumenta la reluctancia del circuito.

Se ha determinado experimentalmente el espesor de la capa de aire correspondiente a un contacto, bajo diferentes valores de la inducción, y se han construído tablas con los resultados obtenidos. Según estas tablas, bajo una inducción de 15000 gauss, a un contacto corresponde un espesor de aire de 0,004 cm., y como hay dos contactos en el electroimán de que nos estamos ocupando, el espesor será en total de 0,008 cm.; tomaremos el valor aproximado por exceso, 0,01 centímetros. Para producir en esta parte del circuito una inducción de 15000 gauss se necesitará un número $N' I$ de amperes-vueltas, dado por la relación:

$$\mathcal{B} = \frac{1{,}25\, N' I \mu}{l},$$

en que $\mathcal{B} = 15000$, $\mu = 1$ y $l = 0{,}01$, por consiguiente:

$$N' I = \frac{15000 \times 0{,}01}{1{,}25} = 120 \text{ amperes-vueltas.}$$

Por lo tanto, habremos de tener:

$$928 + 120 = 1048 \text{ amperes-vueltas,}$$

o sea 524 por carrete, y siendo la corriente de un ampere, habrá 524 espiras por carrete.

Aplicaciones de los electroimanes. — I. Timbres eléctricos. — Un timbre eléctrico se monta como indica el esquema de la figura 144. Cuando se cierra el interruptor A, que es el botón de llamada, la corriente de la pila pasa por el solenoide del electroimán y por el contacto de plata C sobre el que se apoya la punta de plata del tornillo V.

El electroimán se excita y atrae la armadura F, y

el martillo choca con la campana del timbre; pero al mismo tiempo la corriente queda cortada entre el con-

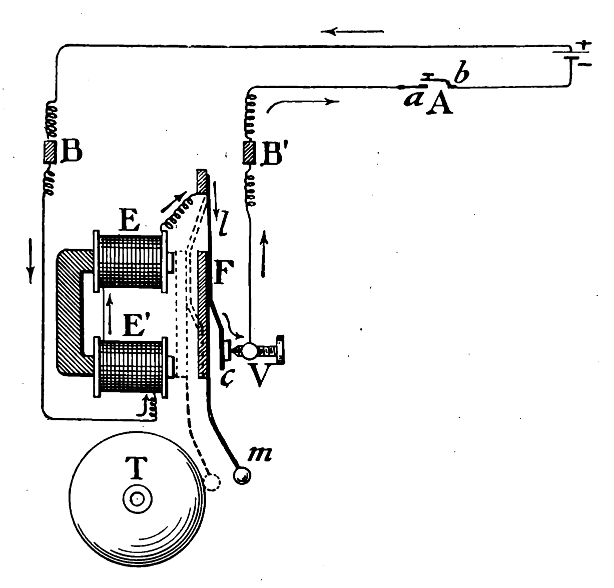


Fig. 144.

tacto y la punta del tornillo, de modo que la lámina flexible *l* vuelve hacia atrás a la armadura y al martillo. La corriente vuelve a restablecerse y la armadura es atraída de nuevo; la corriente se interrumpe entonces, la armadura se separa del electroimán, y así sucesivamente, repitiéndose los choques sobre el timbre durante todo el tiempo que se esté apretando el botón *A*.

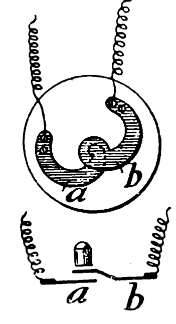


Fig. 145.

Botón de llamada. — Está formado por dos láminas metálicas *a* y *b* unidas a los extremos del conductor y que cierran el circuito al ponerse en contacto (fig. 145).

Ejemplos de instalación de timbres.— La instalación es, como acabamos de ver, muy sencilla; pero a veces hay que hacerla en condiciones especiales que pueden complicar el montaje.

Para facilitar estas instalaciones es muy conveniente adoptar un sistema de montaje que se debe seguir rigurosamente; por ejemplo, el polo positivo de la pila se une con todos los aparatos de llamada, botones, pulsadores, interruptores, etc., y el polo negativo con los timbres; los hilos de unión pondrán en comunicación cada uno de los aparatos de llamada con los de recepción, que son los timbres.

A continuación damos varios ejemplos de montajes que se comprenden fácilmente observando las figuras esquemáticas que los representan. Indicamos con líneas de puntos los conductores que parten del polo negativo, con líneas de rayas los que parten del positivo y con líneas continuas los hilos de unión.

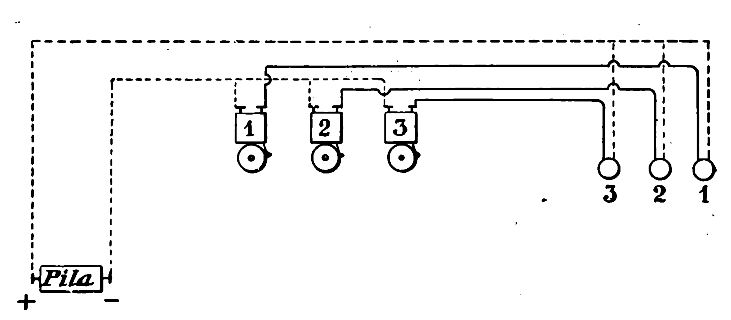


Fig. 146.

1.° Instalación de tres timbres, correspondiendo uno a cada botón (fig. 146);

2.° Instalación que permite, por medio de un solo botón y de un conmutador de clavijas, llamar a varios timbres, separada o simultáneamente (fig. 147);

3.° Instalación de varios timbres con un solo botón (figura 148);

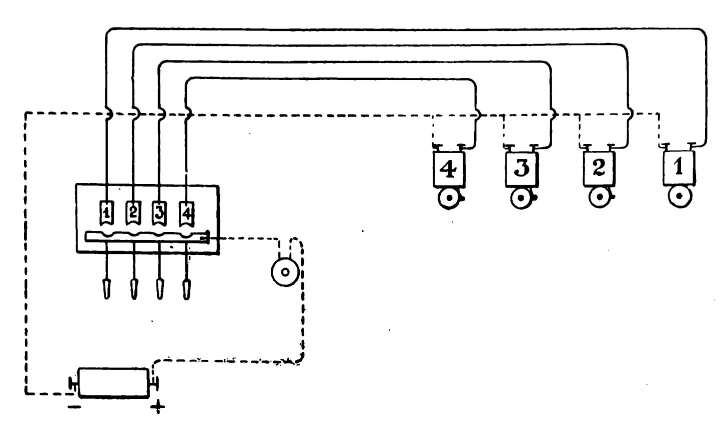


Fig. 147.

4.° Llamada y respuesta por tres hilos, una pila y dos botones (fig. 149);

5.° Llamada y respuesta por dos hilos, dos pilas y dos botones *B*, *B'* (fig. 150).

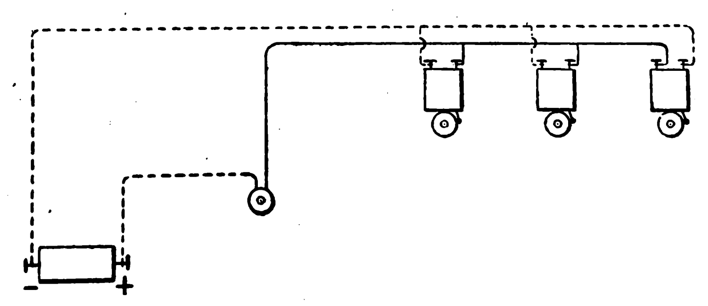


Fig. 148.

Se ve que apretando *B'* sonará el timbre *S*; soltando *B'* vuelve automáticamente a su primitiva posi-

ción y entonces puede sonar S' apretando el botón B, respondiendo así a la llamada de B'.

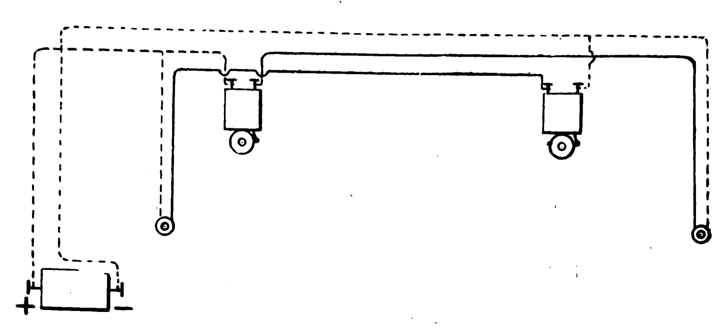


Fig. 149.

Cuadro indicador. — Pudiendo sonar un timbre con varios botones 1, 2 y 3, el cuadro indicador tiene por objeto indicar de qué botón viene la llamada. La figura 151 indica claramente el funcionamiento, la construcción y el montaje de este aparato. Las piezas polarizadas P_1, P_2 y P_3 llevan anotaciones correspon-

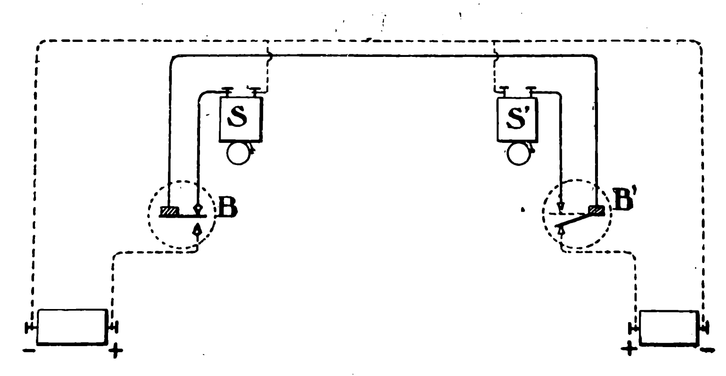


Fig. 150.

dientes a los botones de llamada 1, 2 y 3, y están colocadas cada una entre dos electroimanes. Cuando

no funciona ningún timbre, estas piezas polarizadas se apoyan contra las armaduras de los electroimanes A_1, A_2 y A_3, y las indicaciones que hay sobre estas piezas están ocultas detrás de un vidrio ennegrecido.

Cuando se aprieta el botón 1, por ejemplo, el solenoide del electroimán A_1 es recorrido por una corriente, y el sentido de esta corriente es tal, que

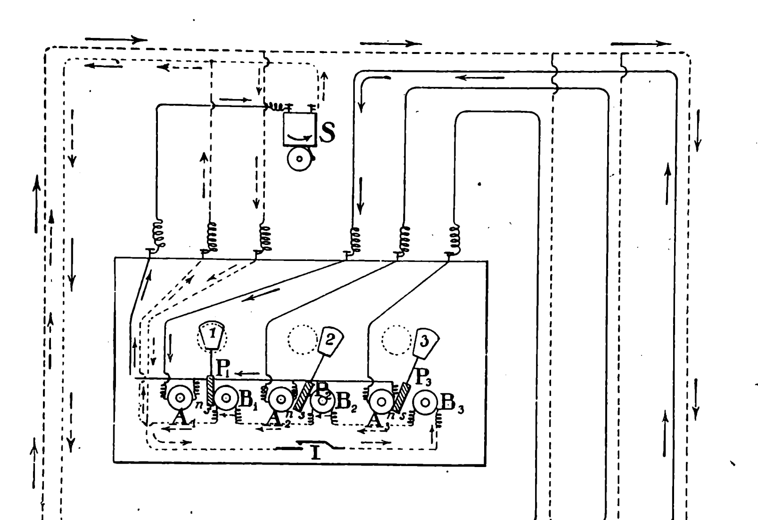


Fig. 151.

desarrolla en el extremo anterior del electroimán un polo del mismo nombre que el que hay en la parte de la pieza P_1 que se apoya sobre él. Esta pieza es repelida y su número se coloca frente a un círculo transparente practicado en el vidrio, haciéndose visible desde fuera. Del mismo modo aparecerían los números 2 y 3 apretando los botones 2 y 3. Se ve además que

cada vez que se aprieta un botón, la corriente pasa por el timbre.

Si se cierra el interruptor I, los electroimanes B_1, B_2 y B_3 son recorridos por una corriente que desarrolla en los extremos anteriores de cada uno de ellos un polo del mismo nombre que el de las partes de las piezas P_1, P_2 y P_3 que se apoyan sobre ellos. Estas piezas son repelidas y las indicaciones que llevan en su parte superior desaparecen.

II. Telégrafo.— Hay muchos sistemas de aparatos telegráficos; pero nosotros indicaremos solamente el principio del más sencillo y a la vez el más extendido: el *telégrafo Morse*.

Cada estación tiene los dos órganos esenciales, que son: el manipulador M y el receptor R.

El manipulador o transmisor es una palanca a c b móvil alrededor del eje c y que permite, como se ve en el esquema (fig. 152), establecer o cortar la corriente en el hilo de la línea en el momento de la transmisión, y también comunicar el receptor de la misma estación con el hilo de la línea en el momento de la recepción.

El receptor está formado por un eloctroimán E, delante de cuyo núcleo puede oscilar alrededor del eje O la armadura A, que va unida a una palanca. El otro extremo de esta palanca lleva una varilla t que termina frente a un marcador m constantemente impregnado de tinta por medio de un rodillo e. Una tira de papel arrollada en p pasa por entre la varilla t y el marcador, y se mueve mediante dos rodillos movidos por un mecanismo de relojería y girando en sentido inverso uno de otro.

Cuando la estación (I) transmite un despacho, la corriente que sale de la pila de esta estación recorre la línea, pasa por el manipulador de la estación (II),

por el electroimán del receptor de esta estación y vuelve por la tierra al polo negativo de la pila. Por la acción de esta corriente, la armadura *A* es atraída, la palanca balancea alrededor del eje *o* y la varilla *t* aprieta el papel contra el marcador *m* impregnado de tinta; el papel se mueve y queda señalado en él un

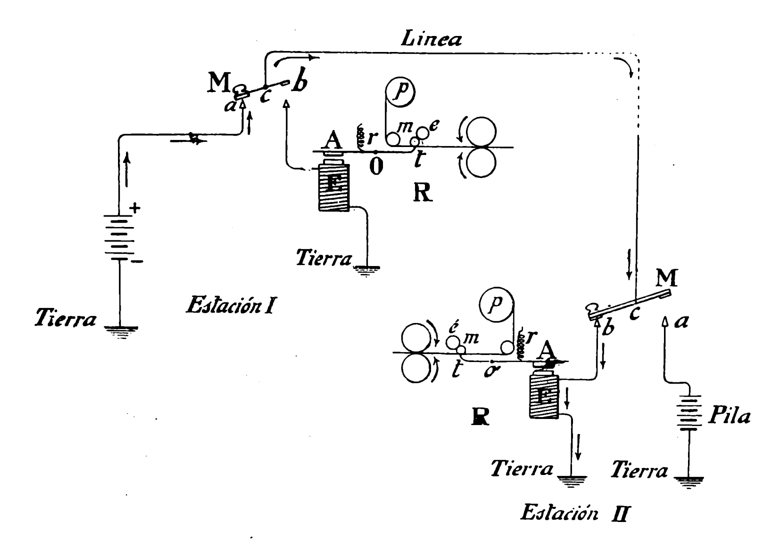


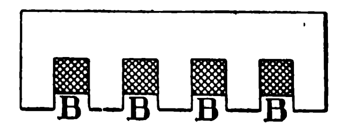
Fig. 152.

trazo. Cuando se interrumpe la corriente por el manipulador de la estación (I), el muelle *r* separa la varilla *t* y cesa la presión que ésta ejercía sobre la tira de papel.

Se podrá por consiguiente transmitir un despacho por medio de signos convencionales trazados sobre el papel y formados de rayas y puntos.

Aplicaciones industriales. — *Sujeción de las piezas construídas con metales magnéticos.* — Las piezas

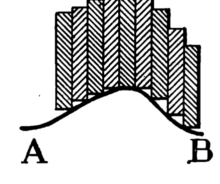
hechas con metales magnéticos pueden manejarse muy rápidamente por medio de un potente electroimán suspendido en el extremo de un aparato de elevación.



B, *B*,... carretes magnetizantes
Fig. 153.

Si la pieza que hay que transportar no presenta superficies planas que puedan adaptarse a los polos del electroimán, la adherencia puede resultar insuficiente.

Se salva este inconveniente empleando un electroimán (figuras 153 y 154) en que las piezas polares están formadas por láminas de hierro que pueden correrse y cuyos extremos se pueden adaptar a las piezas con que se ponen en contacto.



Disposición de las láminas de hierro de una pieza polar sobre un objeto de perfil *A B*.
Fig. 154.

Fijación de las herramientas sobre piezas magnéticas que hay que trabajar.—La figura 155 representa un taladrador montado en la culata de un electroimán; las piezas polares están aplicadas contra una placa de palastro que hay que taladrar, sujetándose el instrumento por la adherencia magnética.

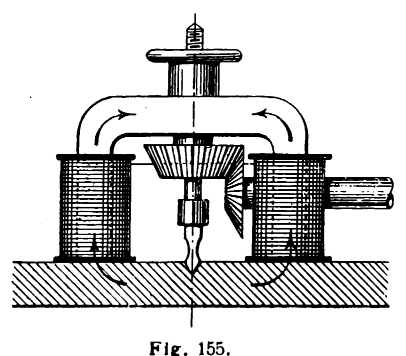


Fig. 155.

Embrague magnético.—La corriente de excitación pasa por los carretes *N* y *S*, y el plato *A* atrae fuertemente al *B* (fig. 156).

La disposición debida a Bovet (fig. 157) es la generalmente adoptada.

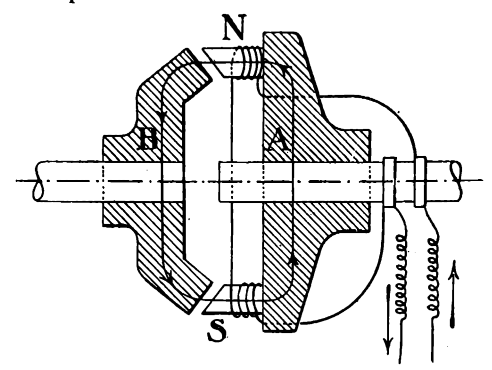


Fig. 156.

Separadores electromagnéticos.—Son aparatos que sirven para separar, por la atracción de un electroimán, las partículas de hierro que puede haber en un cuerpo pulverizado o hecho pedazos.

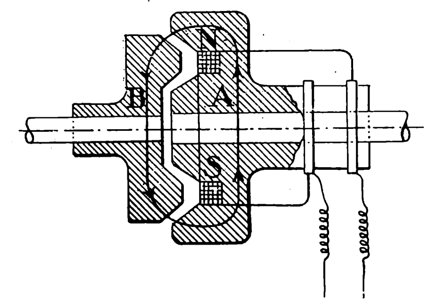


Fig. 157.

Por ejemplo, se utilizan para separar el óxido de hierro de algunos minerales de la ganga terrosa; para extraer del caolín destinado a la fabricación de la porcelana, las partículas de hierro que pueda contener, etc.

III.—Producción de corrientes por imanes. Inducción

Hemos visto que una corriente puede producir un campo magnético y por consiguiente un imán; recípro-

camente, un imán puede producir una corriente en un conductor por efecto de un movimiento relativo del imán y del conductor. Esta propiedad la demostró Faraday en 1832, cuando descubrió los fenómenos de inducción.

Sin exponer los experimentos que sirvieron de base a este importante descubrimiento, estudiaremos las consecuencias, es decir, enunciaremos las leyes a que obedecen estos fenómenos y sus aplicaciones.

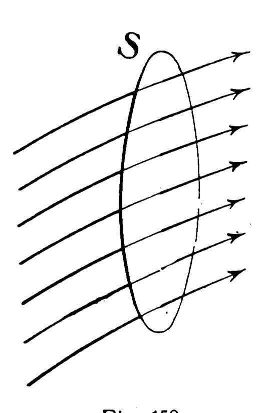


Fig. 158.

I. Producción de corrientes inducidas en un conductor cerrado.—a) *Cuando el flujo que atraviesa un conductor cerrado sufre variaciones, el conductor es recorrido por una corriente mientras duran las variaciones.*—Consideremos una espira formada por un hilo conductor S (fig. 158), situada en un campo de tal modo, que sea atravesada por un flujo Φ; si el flujo sufre variaciones, es decir, si aumenta o disminuye, se comprueba que circula una corriente por la espira. Esta corriente, cuya intensidad es esencialmente variable, se llama *corriente inducida.*

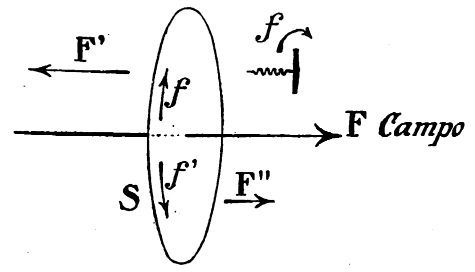
La espira se llama *conductor* o *circuito inducido* o simplemente *inducido,* el campo cuyas líneas de fuerza atraviesan el circuito se designa con el nombre de *campo inductor,* y el imán, el solenoide o el electroimán que produce este campo se llama *sistema inductor* o simplemente *inductor.*

b) *Sentido de la corriente inducida.*—*El sentido de la corriente inducida es tal, que las líneas de*

fuerza que engendra tienden a oponerse a las variaciones del flujo.

Sea un conductor representado por una espira S y sea F la dirección de las líneas de fuerza que cortan su plano.

Supongamos que el flujo aumenta, es decir, que el número de líneas de fuerza a través de la espira aumenta; esta espira es recorrida por una corriente y su sentido será tal, que producirá líneas de fuerza que se oponen al aumento, es decir, de sentido F' opuesto al F (fig. 159). Nos bastará aplicar la regla del sacacorchos que hemos enunciado (pág. 170) para determinar el sentido de la corriente; el sacacorchos debe girar en el sentido f para avanzar en la dirección F'.



f, sentido de la corriente inducida cuando aumenta el flujo; f', sentido de la corriente inducida cuando disminuye el flujo.

Fig. 159.

Si el flujo disminuye, la corriente inducida producirá líneas de fuerza del mismo sentido F'' que las del campo F, y será de sentido f' opuesto al f.

Es fácil comprender que no podría suceder de otro modo; en efecto, si cuando el flujo aumenta la corriente inducida produjera líneas de fuerza del mismo sentido que las del flujo, resultaría un nuevo aumento de este flujo y por consiguiente una nueva corriente inducida, y así sucesivamente. Bastaría, pues, iniciar una variación de flujo para que esta variación prosiguiera por sí misma indefinidamente, produciendo de este modo indefinidamente una corriente inducida en el conduc-

tor sin ningún gasto de trabajo, lo cual es evidentemente imposible.

Regla de Maxwell.—También puede determinarse el sentido de la corriente inducida aplicando la siguiente regla dada por Maxwell (fig. 160).

Se supone un sacacorchos colocado paralelamente a las líneas de fuerza del campo; se llama *sentido positivo* sobre el conductor al sentido en que el sacacorchos debe girar para que avance en la dirección de las líneas de fuerza; el sentido opuesto es el sentido negativo.

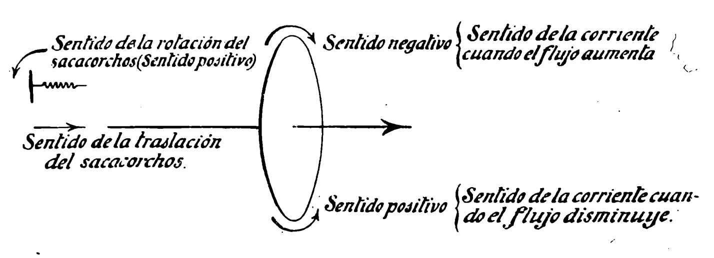


Fig. 160.

Cuando el flujo a través de la espira *aumenta,* la corriente inducida es de sentido *negativo.*

Cuando el flujo *disminuye,* la corriente inducida es de sentido *positivo.*

c) *Fuerza electromotriz inducida.* — Si en un instante dado la corriente inducida tiene un valor i, se puede decir que en este instante la variación de flujo a través del circuito ha producido *en este circuito* una fuerza electromotriz E tal, que $i = \frac{E}{R}$, siendo R la resistencia del circuito. Se la designa con el nombre de *fuerza electromotriz inducida.*

El valor de esta fuerza electromotriz varía también durante las variaciones de flujo que la producen.

Si durante t segundos, el flujo varía en el mismo sentido (siempre aumentando o siempre disminuyendo), pasando del valor Φ al valor Φ', se demuestra que el valor *medio* de la fuerza electromotriz inducida durante el tiempo t es:

$$\frac{\Phi - \Phi'}{t \times 10^8} \text{ volts.}$$

La diferencia $\Phi - \Phi'$ expresa la variación de flujo durante el tiempo t.

Por consiguiente:

El valor medio de la fuerza electromotriz inducida expresada en volts, es igual al número que mide la variación del flujo, dividido por el producto del número que mide en segundos la duración de esta variación por el número 10^8.

Sea T el tiempo en que el flujo tiene el valor Φ; al cabo del tiempo $T + t$ tendrá por valor Φ' y se demuestra que si t se hace cada vez menor, el cociente $\frac{\Phi - \Phi'}{t \times 10^8}$ tiende hacia un valor límite determinado, que es el valor de la fuerza electromotriz inducida correspondiente al tiempo T.

d) *Corriente inducida.*—Según la expresión anterior de la fuerza electromotriz inducida, el valor medio de la corriente inducida durante el tiempo t es:

$$I = \frac{\Phi - \Phi'}{Rt \times 10^8} \text{ amperes,}$$

siendo R la resistencia del circuito.

El valor de la corriente inducida correspondiente al tiempo T es el límite a que tiende la relación anterior cuando el intervalo de tiempo t disminuye tendiendo hacia cero.

e) *Cantidad de electricidad inducida durante el*

tiempo t. — Siendo I el valor medio de la corriente inducida durante el intervalo de tiempo t, la cantidad de electricidad inducida durante este tiempo tiene por valor It, es decir:

$$\frac{\Phi - \Phi'}{Rt \times 10^8} \times t \text{ coulombs},$$

o sea:

$$\frac{\Phi - \Phi'}{R \times 10^8} \text{ coulombs}.$$

EJEMPLO.—*Sobre un núcleo de 10 centímetros de longitud están arrolladas 500 espiras recorridas por una corriente de 5 amperes* (fig. 161). *La sección del hierro es de 30 centímetros cuadrados. El solenoide*

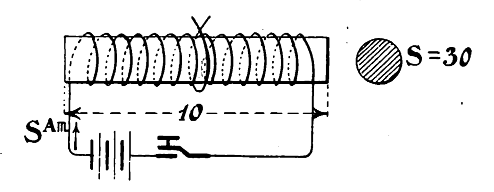


Fig. 161.

así formado está rodeado por una espira. Se corta bruscamente la corriente y sea la duración de esta interrupción igual a $\frac{1}{100}$ *de segundo. ¿Qué valor tiene la fuerza electromotriz inducida en la espira?*

El campo producido por el solenoide es:

$$\mathcal{H} = 1{,}25 \times \frac{500 \times 5}{10} = 312{,}5 \text{ gauss}.$$

Las tablas dan para este valor del campo un coeficiente de permeabilidad $\mu = 60$; la inducción en el hierro es por consiguiente:

$$\mathcal{B} = 312{,}5 \times 60 = 18750 \text{ gauss};$$

el flujo a través de la espira es:

$$\Phi = \mathcal{B} S,$$

o sea:

$$\Phi = 18750 \times 30 = 562500.$$

Cuando se corta la corriente, el flujo es cero, $\Phi' = 0$; luego la variación de flujo es:

$$\Phi - \Phi' = 562500,$$

y como la duración de esta variación es de $\frac{1}{100}$ de segundo, la fuerza electromotriz media inducida tiene por valor:

$$\frac{562500}{\frac{1}{100} \times 10^8} = \frac{56250000}{10^8} = 0{,}5625 \text{ volts.}$$

Si en lugar de una sola espira que rodea al solenoide se tuviera un carrete formado de n espiras, las fuerzas electromotrices inducidas en cada una de ellas serían iguales y del mismo sentido, de modo que estarían acopladas en serie (fig. 162), y la fuerza electromotriz media entre los extremos del carrete inducido sería:

$$n \frac{\Phi - \Phi'}{t \times 10^8} \text{ volts.}$$

Fig. 162.

Si en el ejemplo anterior, el solenoide hubiera estado rodeado por un carrete de 1000 espiras, la fuerza electromotriz inducida habría sido de:

$$1000 \times 0{,}5625 = 562{,}5 \text{ volts.}$$

Diferentes modos de producir corrientes inducidas en un conductor cerrado.—Para estudiar los medios

de producción de corrientes inducidas en un circuito cerrado, por ejemplo en una espira o a lo más en un carrete plano, lo colocaremos en el entrehierro de un circuito magnético.

Hemos visto que el flujo a través del circuito depende:

1.° Del campo en el entrehierro, es decir, del flujo en el circuito magnético o flujo inductor;

2.° Del ángulo que forma el plano del conductor con la dirección del campo;

3.° De la superficie envuelta por el conductor.

1.° *Producción de la fuerza electromotriz por variación del flujo inductor.*—Este flujo tiene por valor:

$$\Phi = \frac{1.25\, NI}{\mathcal{R}}$$

siendo 1,25 NI la fuerza magnetomotriz aplicada al circuito magnético inductor (N es el número de espiras inductoras; I la corriente en estas espiras) y $\mathcal{R}$ la reluctancia del circuito magnético:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S},$$

en que l es la longitud de una línea media de fuerza y S la sección del circuito. Por consiguiente se podrá hacer variar el flujo, es decir, producir una fuerza electromotriz inducida, actuando sobre la fuerza magnetomotriz o sobre la reluctancia.

Se actúa sobre la fuerza *magnetomotriz* haciendo variar por medio de un reostato *Re* la corriente inductora (fig. 163), o bien intercalando o aislando espiras inductoras por medio de un conmutador (fig. 164).

Se actúa sobre la *reluctancia* aproximando o separando los núcleos N y N' en el entrehierro o poniendo

en la culata *C* una pieza de hierro que hace variar en esta región la sección del circuito magnético, o bien

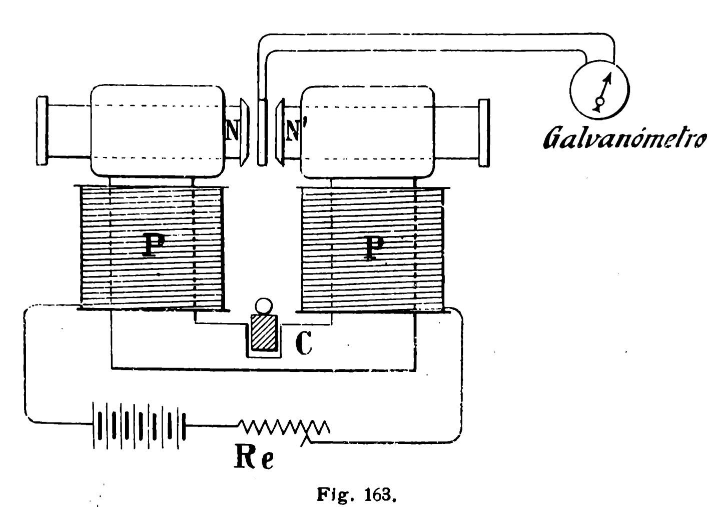


Fig. 163.

introduciendo en el entrehierro una masa de hierro o retirándola.

2.º *Producción de la fuerza electromotriz de inducción por variaciones de orientación del plano del conductor en el campo.*—Si no varía el campo en el entrehierro, se sabe que el flujo a través

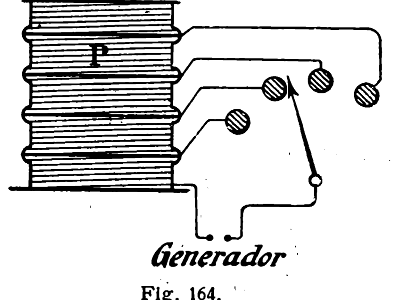


Fig. 164.

del conductor varía al mismo tiempo que el ángulo que forma su plano con la dirección del campo. En efecto, hemos visto que el flujo es máximo cuando el plano de la espira es perpendicular a la dirección del campo, que disminuye a medida que el ángulo

del plano de la espira y del campo disminuye, y que se anula cuando el plano de la espira está en la dirección del campo.

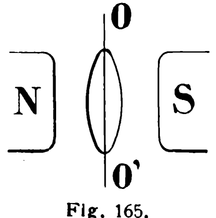
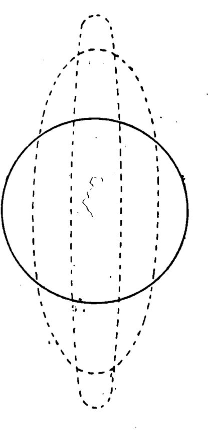


Fig. 165.

Por consiguiente, si se hace girar la espira alrededor de un eje $O\ O'$ situado en su plano y perpendicular a la dirección de las líneas de fuerza del campo, se obtiene una fuerza electromotriz inducida durante la rotación (fig. 165).

3.º *Producción de la fuerza electromotriz de inducción por las variaciones de la superficie limitada por el conductor.*—Si la espira es deformable, se concibe que pueda variar su superficie; por ejemplo, se le puede dar la forma de una circunferencia y aplastarla más o menos dándole una forma alargada. Mientras dura esta deformación se produce una fuerza electromotriz de inducción en la espira (fig. 166).


Fig. 166.

II. Producción de fuerzas electromotrices inducidas en un conductor abierto. — a) *Cuando un conductor no cerrado se traslada en un campo cortando las líneas de fuerza de este campo, se origina una fuerza electromotriz de inducción entre sus extremos.*

b) *Sentido de la fuerza electromotriz.—Regla de los tres dedos* o *de Fleming.*—Supongamos el caso particular de un conductor rectilíneo que se mueve cortando perpendicularmente las líneas de fuerza de un campo uniforme. El sentido de la fuerza electromotriz indu-

cida en este conductor se determina del modo siguiente:

Se colocan en tres direcciones aproximadamente perpendiculares entre sí el pulgar, el índice y el medio de la *mano derecha;* después se orienta el índice en el sentido del campo, el pulgar en el sentido de la traslación del conductor, y entonces la dirección del dedo medio indica el sentido de la corriente que tiende a producir la fuerza electromotriz inducida (fig. 167) ([1]).

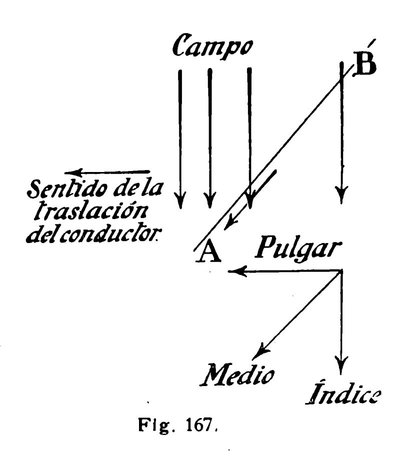


Fig. 167.

c) *Valor de la fuerza electromotriz inducida.* — Sean $\mathscr{H}$ gauss el valor del campo, v la velocidad del conductor en centímetros por segundo, l su longitud

([1]) Una variante de la regla de Fleming, más fácil de recordar, es la siguiente, debida al ingeniero G. Schmidt-Ulm:

Se coloca la *mano derecha* extendida sobre el conductor considerado, de manera que las líneas de fuerza incidan perpendicularmente sobre la palma; el dedo pulgar, formando ángulo recto con los otros y dirigido según el movimiento del conductor; la dirección común de los cuatro dedos restantes indica la dirección de la fuerza electromotriz inducida (fig. 167 bis).

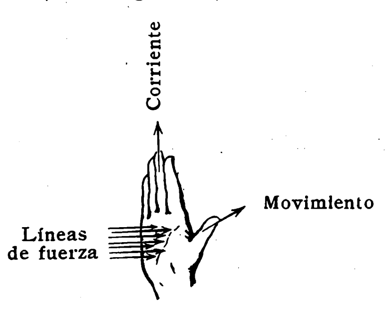


Fig. 167 bis.

Esta regla se aplica siempre que quiere saberse inmediatamente el sentido de la corriente en las espiras que rodean el anillo de una dinamo, sabiendo la dirección del flujo, es decir, conociendo la posición de los polos.—N. DEL T.

en centímetros; el valor de la fuerza electromotriz en este conductor es:

$$E = \frac{\mathcal{H} l v}{10^8} \text{ volts.}$$

Ley de Lenz. — Las reglas anteriores referentes al sentido de la corriente inducida son consecuencias de la ley general a que obedecen estas corrientes, que es la ley de Lenz:

Toda corriente inducida tiene un sentido tal, que tiende a oponerse a la causa que la produce.

Auto-inducción (1).—**Coeficiente de auto-inducción.** —Supongamos un solenoide recorrido por una corriente *I*; en el interior de este solenoide se producirán líneas de fuerza y por consiguiente las espiras quedarán atravesadas por un flujo cuyo valor depende del valor de la corriente *I*.

Si la corriente *I* experimenta variaciones, el flujo también varía y por consiguiente se produce una fuerza electromotriz inducida en las espiras, originando una corriente inducida que se suma algebraicamente a la corriente principal *I* durante su período de variación. Por lo tanto, las variaciones de la corriente en el circuito considerado producen una fuerza electromotriz llamada *fuerza electromotriz de auto-inducción* y por consiguiente una corriente, que se llama *corriente de auto-inducción*.

Se llama *coeficiente de auto-inducción* de un circuito al *cociente que resulta de dividir el número que mide el flujo que lo atraviesa cuando es recorrido*

(1) Se emplean indistintamente los nombres *auto-inducción* y *self-inducción*, siendo este último el adoptado por casi todos los países; la palabra inglesa *self* significa en castellano *a sí mismo*, es decir, *auto*.—N. DEL T.

por una corriente, por el número que mide esta corriente.

Por consiguiente, si un circuito recorrido por una corriente I es atravesado por un flujo Φ producido por la misma corriente, el coeficiente de auto-inducción del circuito tiene por valor:

$$\mathcal{L} = \frac{\Phi}{I}.$$

La unidad de coeficiente de auto-inducción se designa con el nombre de *henry* (1).

I. Caso de un conductor colocado en un medio no magnético.—En este caso sabemos que el coeficiente de permeabilidad del medio es constante e igual a la unidad, luego el flujo Φ es proporcional a la corriente I y la relación $\frac{\Phi}{10^8 I}$ es la misma, cualquiera que sea el valor de I.

Tomando el caso particular en que $I = 1$ ampere, se tiene:

$$\mathcal{L} = \frac{\Phi}{10^8}.$$

Por consiguiente: *el coeficiente de auto-inducción de un circuito situado en un medio no magnético es igual al número que mide el flujo engendrado a través de este circuito, dividido por* 10^8, *cuando la corriente que lo recorre es de 1 ampere.*

Sea, por ejemplo, un circuito constituído por un solenoide de sección igual a S centímetros cuadrados, formado por N espiras arrolladas en una longitud

(1) Esta unidad está tomada de manera que expresando el flujo Φ en *maxwells* y la intensidad I en amperes, el coeficiente de auto-inducción en henrys viene dado por:

$$\mathcal{L} = \frac{\Phi}{10^8 I}.$$

N. DEL T.

de l centímetros: queremos calcular su coeficiente de auto-inducción.

El campo producido en el interior, por una corriente de 1 ampere, es:

$$\mathcal{H} = 1{,}25 \frac{N}{l} \text{ gauss;}$$

el flujo a través de una espira es:

$$\Phi = 1{,}25 \frac{N}{l} S \text{ maxwells}$$

y a través de las N espiras:

$$1{,}25 \frac{N}{l} S \times N.$$

El coeficiente de auto-inducción del solenoide es, por consiguiente, según la definición anterior:

$$\mathcal{L} = \frac{1{,}25\, N^2\, S}{10^8\, l} \text{ henrys.}$$

Cuando un circuito de coeficiente de auto-inducción $\mathcal{L}$ es recorrido por una corriente I, el flujo total que lo atraviesa es $\mathcal{L}I$. Si la corriente pasa del valor I al valor I', el flujo varía de $\Phi = 10^8\, \mathcal{L}I$ a $\Phi' = 10^8\, \mathcal{L}I$, es decir, que la variación del flujo es:

$$\Phi - \Phi' = 10^8\, \mathcal{L}(I - I'),$$

y si t es la duración en segundos de esta variación, la fuerza electromotriz de auto-inducción que se origina en el circuito es:

$$\frac{\Phi - \Phi'}{10^8\, t} \text{ volts} = \frac{10^8\, \mathcal{L}(I - I')}{10^8\, t} = \frac{\mathcal{L}(I - I')}{t} \text{ (1).}$$

(1) De aquí se deduce la verdadera definición del henry, que es la siguiente: el henry es el coeficiente de auto-inducción de un circuito tal, que la variación de un ampere por

II. Caso del circuito colocado en un medio magnético.—El coeficiente de permeabilidad de este medio depende de la inducción a que esté sometido y por consiguiente de la corriente I en el circuito; luego el valor del flujo Φ creado por la corriente no es proporcional a I y el cociente $\frac{\Phi}{10^8 I}$ no es independiente de I.

El coeficiente de auto-inducción de un circuito en estas condiciones no queda definido sino conociendo el valor correspondiente de la corriente que lo recorre.

Tomemos como ejemplo el caso del solenoide anterior, pero arrollado sobre un núcleo de hierro.

Para una corriente I, el campo creado por el solenoide es:

$$\mathcal{H} = 1{,}25 \frac{NI}{l} \text{ gauss.}$$

A este valor del campo corresponde un coeficiente de permeabilidad μ, que depende por lo tanto de I.

La inducción en el hierro es:

$$\mathcal{B} = 1{,}25 \frac{NI}{l} \mu,$$

y el flujo total a través de las N espiras es:

$$\Phi = 1{,}25 \frac{NI}{l} \mu S \times N,$$

o sea:

$$\Phi = \frac{1{,}25 N^2 I S \mu}{l}.$$

segundo de la corriente que lo recorre, desarrolla una fuerza electromotriz de auto-inducción igual a un volt. Es decir, que $1\ henry = \frac{1\ volt \times 1\ segundo}{1\ ampere}$, y como $\frac{1\ volt}{1\ ampere} = 1\ ohm$, se tiene que 1 *henry* = 1 *ohm* × 1 *segundo*. Por esta razón los ingleses usan a veces la palabra *sec-ohm* en vez de *henry*.—N. DEL T.

El coeficiente de auto-inducción del solenoide es:

$$\mathcal{L} = \frac{\Phi}{10^8 I},$$

o bien:

$$\mathcal{L} = \frac{1,25\, N^2\, S}{10^8\, l}\, \mu.$$

Este coeficiente varía con I, por variar μ cuando varía I.

Sentido de la corriente de auto-inducción.—Puede determinarse por la ley de Lenz.

En efecto, supongamos que la corriente disminuye en el circuito; mientras dura la variación, se produce una corriente de auto-inducción en el circuito, cuya causa es la disminución de la corriente. El sentido de esta corriente es tal, que tiende a oponerse a esta disminución; por consiguiente debe sumarse a la corriente principal durante el período de variación, o sea, que es del mismo sentido que la corriente principal.

Por el contrario, si la corriente principal aumenta, la corriente de auto-inducción producida tiende a oponerse a este aumento; por lo tanto, es de sentido contrario al de la corriente principal.

Analogía entre la auto-inducción y la inercia.—Según lo que acabamos de estudiar, el efecto de la auto-inducción en un circuito es tender a mantener constante el valor de la corriente en el circuito. Es muy fácil ver la analogía que hay entre la propiedad eléctrica de la auto-inducción y la propiedad mecánica de la inercia; en efecto, se sabe que gracias a esta propiedad, un cuerpo en movimiento (el volante de una máquina de vapor, por ejemplo) tiende a conservar una velocidad constante.

Extra-corriente de cierre.—Sea un circuito de resistencia R; cuando se aplica entre sus extremos una

diferencia de potencial de u volts, se produce una corriente:

$$I = \frac{u}{R}.$$

En el momento de cerrar el circuito, el flujo que lo atraviesa pasa del valor 0 al valor $10^8 \mathcal{L} I$, siendo $\mathcal{L}$ su coeficiente de auto-inducción. De aquí resulta que durante el tiempo (muy corto) del cierre del circuito, se produce una corriente variable, decreciente muy rápidamente y de sentido contrario al de la corriente I, y que se llama extra-corriente de cierre.

La producción de esta corriente requiere de parte del generador de corriente una cierta energía, facilitada durante el período de establecimiento de la corriente.

Extra-corriente de apertura.—Cuando se corta el circuito recorrido por una corriente I, el flujo a través del circuito pasa de $10^8 \mathcal{L} I$ a 0, y se produce una corriente de auto-inducción del mismo sentido que I, durante el período, muy corto, de la ruptura.

Una cantidad de energía igual a la facilitada por el generador durante el período de establecimiento de la corriente es restituída entonces por el circuito, saltando una chispa en el punto de ruptura.

Aplicación: carrete de Rhumkorff. — Tiene por objeto obtener por medio de corrientes de muy poco voltaje, como las producidas por las pilas, corrientes inducidas de gran tensión y de poca intensidad.

El carrete de Rhumkorff comprende:

1.° Un circuito primario formado por varias espiras de hilo grueso arrollado sobre un haz de hilos de hierro aislados unos de otros. Este circuito está unido a los polos de un generador de corriente, por medio

de un interruptor especial que permite abrir y cerrar el circuito con gran rapidez.

2.° Un circuito secundario constituído por un número considerable de espiras de hilo muy delgado

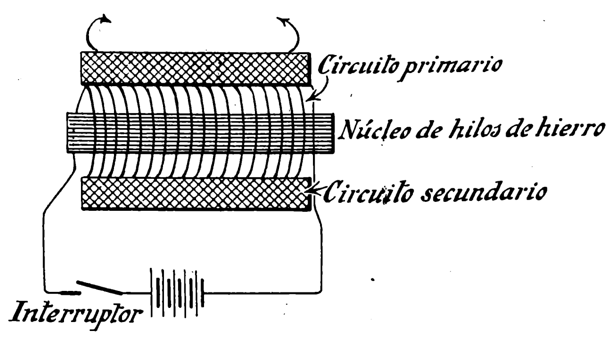


Fig. 168.

arrollado sobre el carrete primario y cuyos extremos están unidos a dos bornes que son los dos polos del carrete (fig. 168).

Cuando se establece la corriente en el primario por medio del interruptor, un flujo atraviesa el haz de hilos de hierro y, por consiguiente, el plano de las espiras del secundario (fig. 169).

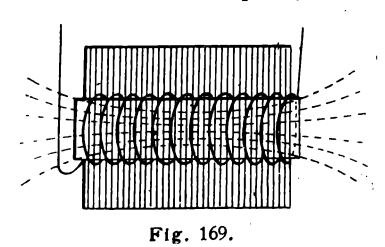


Fig. 169.

Cuando se corta la corriente, se produce entre los extremos de estas espiras una fuerza electromotriz inducida, tanto más grande cuanto más grandes son el número de espiras del primario, la superficie de la sección del haz de hilos de hierro y la corriente, y cuanto más rápida es la ruptura, es decir, cuanto mayor es el número de interrupciones por segundo.

Las líneas de fuerza producidas por el circuito primario tienden a cerrarse por el exterior, y un cierto número de ellas cortan el plano de las espiras del secundario en sentido contrario de las que atraviesan su plano pasando por el hierro. En tales condiciones, el flujo a través de estas espiras es igual a la diferencia entre el flujo que las atraviesa en un sentido y el que las atraviesa en sentido contrario (figura 170).

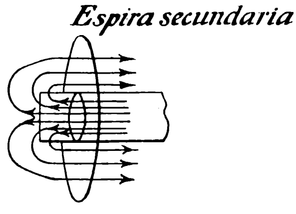


Fig. 170.

Ahora bien, las espiras próximas a los extremos están cortadas sobre todo por las líneas de fuerza exteriores, lo que hace disminuir el valor de la fuerza electromotriz inducida.

Fig. 171.

Para evitar este inconveniente, Rochefort ha construído para la telegrafía sin hilos carretes en que las espiras inducidas están agrupadas hacia el centro del núcleo (fig. 171).

Interruptor.—El más generalizado de los interruptores es el interruptor de martillo (figura 172).

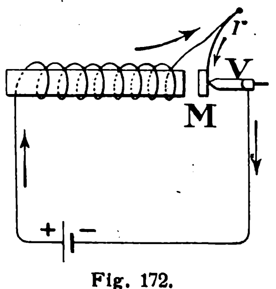


Fig. 172.

Un martillo de hierro *M* fijo en el extremo de un muelle *r* se apoya sobre un tornillo *V*. La corriente pasa por el circuito de hilo grueso, el muelle y el tornillo; el martillo de hierro es atraído y la corriente interrumpida, cesando la

atracción y volviendo el martillo a su posición primitiva por la acción del muelle; pero al ponerse otra vez en contacto con el tornillo vuelve a pasar la corriente para ser interrumpida en seguida, y as' sucesivamente.

Corrientes de Foucault. — Cuando una masa de cobre o hierro, por ejemplo, se mueve en un campo magnético, se producen en ella corrientes inducidas que se cierran sobre sí mismas y a las cuales se les ha dado el nombre de corrientes de Foucault (fig. 173).

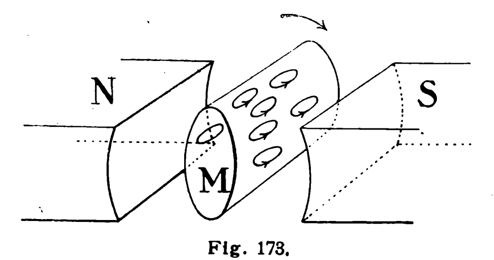


Fig. 173.

Estas corrientes, cuya forma es imposible determinar, se desarrollan en planos perpendiculares a la dirección del campo y están sometidas a la ley de Lenz, o sea, que tienden a oponerse al movimiento que las produce. Para producir el movimiento de la masa, es preciso gastar una energía considerable que se transforma en calor en la masa conductora.

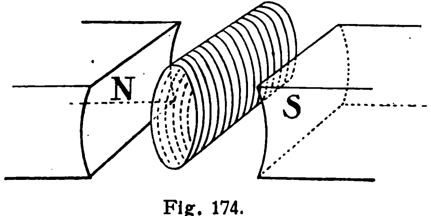


Fig. 174.

Cuando se quiere evitar la formación de estas corrientes es necesario dividir las masas conductoras en láminas muy delgadas separadas unas de otras por aisladores, barniz o papel, de tal modo que los planos de las láminas sean paralelos a la dirección del campo (fig. 174).

En estas condiciones, las corrientes de Foucault no pueden producirse más que en el espesor de las láminas y quedan considerablemente reducidas; la pérdida de energía ocasionada por el movimiento de la masa en el campo queda asimismo muy disminuída.

Las corrientes de Foucault se utilizan en varios aparatos de mediciones: galvanómetros, amperímetros, voltímetros, etc. Estos aparatos están provistos de una parte móvil, que en el momento de hacer la medición se desvía, y una aguja fija sobre esta parte móvil toma una posición de equilibrio que permite determinar la magnitud que se trata de medir. Pero el equilibrio no es estable sino después de una serie de oscilaciones alrededor de esta posición, lo cual hace que las medidas sean muy laboriosas y a veces poco seguras. Para evitar este inconveniente, es decir, para amortiguar las oscilaciones, se fija sobre la parte móvil del aparato una masa de cobre rojo que se coloca entre los dos polos de un imán. Las oscilaciones dan lugar a la producción en esta masa de corrientes de Foucault que se oponen a su movimiento y por tanto lo amortiguan.

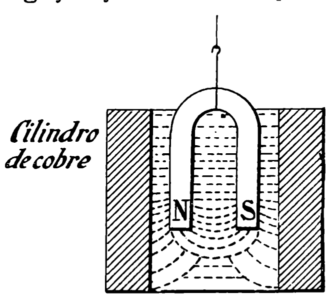


Fig. 175.

A veces la parte móvil es un imán y entonces basta introducirlo en un cilindro de cobre rojo. En su movimiento, el imán arrastra consigo sus líneas de fuerza, de tal modo que las corrientes de Foucault se producen en el cilindro de cobre y amortiguan las oscilaciones del imán (fig. 175).

Movimiento en un campo de un conductor recorrido por una corriente.—I. *El conductor es un circuito cerrado.* —Si un imán N_1S_1 móvil alrededor de su centro de gravedad se coloca en un campo NS, está sometido a un par que lo orienta paralelamente al campo y de tal modo, que las líneas de fuerza del campo están dirigidas de su polo sur hacia su polo norte (fig. 176).

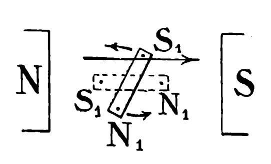


Fig. 176.

Consideremos un cuadro formado por un cierto número de espiras arrolladas sobre sí mismas y recorridas por una corriente. Sabemos que este cuadro produce un campo cuyas líneas de fuerza son perpendiculares a su plano y cuya dirección está dada por la regla del sacacorchos (pág. 170).

De aquí se deduce que el cuadro obra como un imán cuyo eje es perpendicular a su plano y cuyo polo sur está a la derecha de un observador tendido a lo largo del conductor que forma el cuadro, de modo que la corriente le entre por los pies y le salga por la cabeza, mirando al interior del cuadro (figura 177).

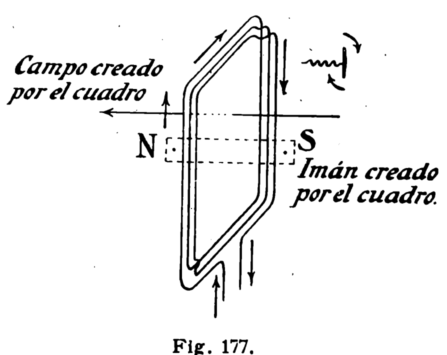


Fig. 177.

La cara del cuadro que está al mismo lado que el polo sur se llama *cara negativa*.

Por consiguiente, si el cuadro está colocado en un campo obrará como el imán que en realidad produce, y por lo tanto se orientará de modo que su plano sea

perpendicular a las líneas de fuerza del campo y que estas líneas de fuerza entren por su cara negativa. Ahora bien, cuando su plano es perpendicular a las líneas de fuerza, el flujo que lo atraviesa es máximo; por lo tanto:

Cuando un cuadro formado por una o varias espiras recorridas por una corriente se coloca en un campo, queda sometido a una acción mecánica que tiende a orientarlo en una posición tal, que el flujo máximo lo atraviese por su cara negativa.

Supongamos que este cuadro sea móvil alrededor de un eje situado en su plano y perpendicular a las líneas de fuerza del campo.

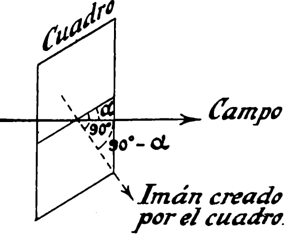


Fig. 178.

Sabemos que obra como un imán perpendicular a su plano y cuyo momento magnético es *sni* (pág. 172). Luego si el cuadro está en la dirección de las líneas de fuerza del campo, el par que tiende a colocarlo perpendicularmente a esta dirección es:

$$C = \mathcal{H} \times sni \quad \text{(pág. 164).}$$

Si el cuadro forma un ángulo α con la dirección del campo (fig. 178), el imán que produce forma un ángulo igual a $96^{\circ} - \alpha$ con esta dirección y el par que actúa sobre el cuadro es:

$$C = \mathcal{H}\, sni \operatorname{sen} (90 - \alpha) \quad \text{(pág. 165),}$$

o sea:

$$C = \mathcal{H}\, sni \cos \alpha.$$

II. *El conductor no es cerrado.*—Consideraremos el caso particular de un conductor rectilíneo perpen-

dicular a la dirección de las líneas de fuerza de un campo uniforme.

Se demuestra que este conductor está sometido a una fuerza que tiende a trasladarlo en una dirección perpendicular al plano formado por la dirección de las líneas de fuerza y la del conductor. El sentido de esta fuerza se determina por la siguiente regla de los tres dedos: Se disponen los tres dedos de la *mano izquierda*, medio, índice y pulgar; en tres direcciones aproxima-

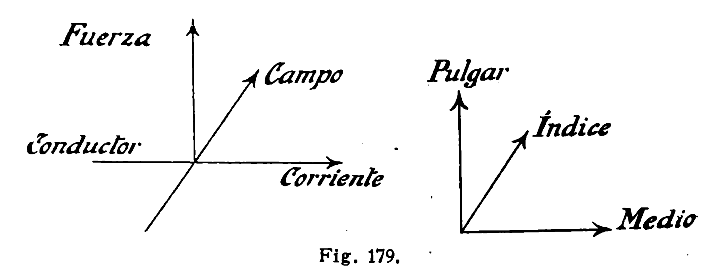


Fig. 179.

damente perpendiculares entre sí; se orienta el índice en el sentido del campo, el medio en el de la corriente, y el pulgar indica el sentido de la fuerza que actúa sobre el conductor (fig. 179) ([1]).

([1]) Como más fácil de retener, recomendamos la siguiente regla, correlativa de la dada en la página 221.

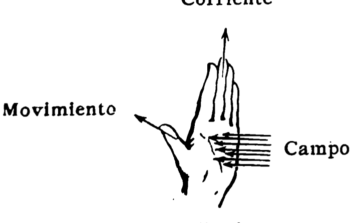


Fig. 179 bis.

Se coloca la *mano izquierda* en la dirección de la corriente, de manera que el sentido de ésta coincida con la de los cuatro dedos, del índice al meñique, y de modo que las líneas de fuerza incidan perpendicularmente sobre la palma; el pulgar colocado aproximadamente perpendicular a los otros dedos, indicará el sentido del movimiento del conductor (fig. 179 bis).—N. DEL T.

CAPÍTULO X

Unidades mecánicas y eléctricas

Sistema C. G. S.—Unidades prácticas

Medir una cantidad A es compararla con otra cantidad B de la misma especie, que se toma por unidad, y el número que expresa las veces que la cantidad A contiene a la unidad B es la medida de la cantidad A.

Un sistema de unidades está formado por un conjunto de unidades mediante las cuales pueden medirse todas las magnitudes conmensurables. Estas magnitudes no son todas independientes entre sí; algunas pueden estar relacionadas por una relación independiente de las unidades tomadas, y esta relación existirá evidentemente entre sus unidades respectivas; en este caso, una de estas unidades depende de las otras y está determinada por estas otras.

Por ejemplo, la velocidad V de un móvil animado de un movimiento uniforme es, por definición, el camino recorrido en la unidad de tiempo, y se obtiene dividiendo el número L que mide la longitud recorrida, por el número T que mide el tiempo empleado en recorrerla:

$$V = \frac{L}{T}.$$

Por consiguiente, la unidad de velocidad es la velocidad de un móvil que recorre con movimiento uniforme, la unidad de longitud en la unidad de tiempo. Luego si tomamos una determinada unidad de longitud y otra de tiempo, la unidad de velocidad quedará determinada, no pudiéndose tomar arbitrariamente.

Es decir, que un sistema de unidades comprende:

1.° Un cierto número de unidades independientes entre sí, y por consiguiente tomadas arbitrariamente, que son las *unidades fundamentales* del sistema.

2.° Otras unidades, determinadas por las primeras. Dichas unidades son las *unidades derivadas*.

Un sistema queda definido por sus unidades fundamentales.

Condiciones que debe reunir un sistema de unidades.—Puede imaginarse un gran número de sistemas de unidades; mas para que un sistema sea aceptable, es decir, que pueda satisfacer a las necesidades de la práctica, es preciso:

1.° Que puedan realizarse materialmente ciertas unidades (o bien sus múltiplos o submúltiplos), es decir, construir para cada una de ellas un *patrón* cuya magnitud se aproxime a la que resulta de la definición de la unidad, tanto como lo permita el estado de conocimientos científicos en el momento en que se haga. Estos patrones constituyen entonces las unidades del sistema.

Las otras unidades no realizables quedan perfectamente definidas por las primeras, de donde se derivan.

Se obtienen copias de los patrones, con más o menos aproximación, pudiendo siempre compararse con sus patrones respectivos para su comprobación.

2.° Cada una de las unidades, definidas por un patrón y representadas por una copia de este patrón,

debe ser invariable, es decir, independiente del tiempo y del lugar en que se utilice.

Sistema Centímetro—Gramo-peso—Segundo

Unidades fundamentales.—Las unidades fundamentales de este sistema son: una unidad de longitud, una unidad de fuerza (o de peso) y una unidad de tiempo.

La *unidad de longitud* es el *centímetro,* que es la centésima parte del metro patrón o metro tipo, que es la longitud, a cero grados centígrados, comprendida entre dos trazos marcados sobre una regla de platino iridiado que se conserva en los *archivos nacionales* (París).

La *unidad de fuerza* es el *gramo-peso,* que es la milésima parte del kilogramo, siendo éste el peso de una masa de platino iridiado que hay en los *archivos nacionales;* es decir, la fuerza de atracción que ejerce la tierra sobre esta masa en dicho lugar.

La *unidad de tiempo* es el *segundo,* que es la 86400.ª parte del día solar medio.

Unidades derivadas.—Estudiaremos solamente las unidades derivadas de este sistema que utilizaremos más adelante.

1.ª UNIDAD DE ACELERACIÓN. — La aceleración que tiene un cuerpo animado de un movimiento uniformemente acelerado es el aumento que experimenta la velocidad de este cuerpo en la unidad de tiempo. La unidad de velocidad en el sistema que consideramos es la velocidad de un móvil que recorre un centímetro en un segundo. Luego *la unidad de aceleración es la aceleración que adquiere un móvil cuya veloci-*

dad aumenta cada segundo en un centímetro por segundo.

2.ª UNIDAD DE MASA.—Se sabe que si se aplica a un cuerpo una fuerza constante en magnitud y dirección, este cuerpo toma un movimiento uniformemente acelerado.

Consideremos un cuerpo y apliquémosle una fuerza F_1; este cuerpo tomará un movimiento uniformemente acelerado, y sea γ_1 la aceleración de este movimiento; si aplicamos otra fuerza F_2 a este mismo cuerpo, tomará otro movimiento uniformemente acelerado, cuya aceleración será γ_2; otra fuerza F_3 le comunicará otra aceleración γ_3, y así sucesivamente.

Se demuestra en Física, que:

$$\frac{F_1}{\gamma_1} = \frac{F_2}{\gamma_2} = \frac{F_3}{\gamma_3} = \ldots$$

Luego el cociente $\frac{F}{\gamma} = m$, que resulta de dividir una fuerza cualquiera F aplicada a un cuerpo, por la aceleración γ que toma este cuerpo, es constante, es decir, independiente de la fuerza aplicada.

Por consiguiente, se puede decir que este cociente, que sólo varía con el cuerpo, caracteriza a este cuerpo desde el punto de vista mecánico.

Se ve que mientras más grande sea m, mayor ha de ser el esfuerzo necesario para comunicar a este cuerpo una aceleración dada.

La relación $\frac{F}{\gamma}$ expresa, por lo tanto, la dificultad que hay en acelerar el movimiento del cuerpo, y por consiguiente en poner a éste en movimiento. Ahora bien, para decir que es difícil poner un cuerpo en movimiento o modificar su movimiento, se dice ordinariamente que dicho cuerpo tiene una gran *masa;*

así hemos llegado a definir la *masa* de un cuerpo por la relación $\frac{F}{\gamma}$ que la caracteriza. Es decir, que por definición, la masa m de un cuerpo está medida por el cociente que resulta de dividir el número que mide una fuerza cualquiera aplicada a este cuerpo, por el número que mide la aceleración que toma dicho cuerpo:

$$m = \frac{F}{\gamma}.$$

Luego si $F = 1$ y $\gamma = 1$, se tiene $m = 1$.

Por consiguiente, *la unidad de masa es la masa de un cuerpo tal, que si se le aplica una fuerza igual a la unidad de fuerza, este cuerpo adquiere un movimiento cuya aceleración es la unidad de longitud en la unidad de tiempo.*

En el sistema que estamos considerando, *la unidad de masa es la masa de un cuerpo que por la acción de un gramo-peso adquiere una aceleración de un centímetro por segundo en cada segundo.*

Esta unidad no tiene nombre especial.

3.ª PAR DE FUERZAS.—Un cuerpo está sometido a la acción de un par, cuando en dos de sus puntos hay aplicadas fuerzas paralelas, iguales y dirigidas en sentidos contrarios. La magnitud del par es igual, por definición, al producto del número F que mide ambas fuerzas, por el número l que mide la distancia entre las direcciones de estas dos fuerzas (siendo esta distancia la longitud de la perpendicular común a las direcciones de las fuerzas, comprendida entre ambas):

$$C = F \times l.$$

Por lo tanto, si $F = 1$ y $l = 1$, se tiene $C = 1$.

La unidad de par es, por consiguiente, el valor del par formado por dos fuerzas iguales a un gramo-peso, siendo la distancia entre las direcciones de estas fuerzas igual a un centímetro.

Se da a esta unidad el nombre de *gramo-centímetro-par* y se emplea con mucha frecuencia su múltiplo el *kilográmetro-par*, teniéndose evidentemente:

1 kilográmetro-par = 1000 × 100 gramos-centímetro-par
1 kilográmetro-par = 10^5 gramos-centímetro-par.

4.ª TRABAJO.—Supongamos una fuerza constante que traslada su punto de aplicación en su misma dirección. Cuando el punto pasa de una posición a otra, dicha fuerza ha efectuado un trabajo que por definición es igual al producto del número F que mide la fuerza por el número l que mide el camino recorrido por el punto:

$$\mathcal{C} = F \times l.$$

La unidad de trabajo es, por consiguiente, el trabajo efectuado por la unidad de fuerza cuando mueve su punto de aplicación a lo largo de la unidad de longitud en su propia dirección.

En el sistema centímetro—gramo-peso—segundo, *la unidad de trabajo es el trabajo efectuado por una fuerza de un gramo que traslada su punto de aplicación en su propia dirección a lo largo de un centímetro.* Esta unidad es el *gramo-centímetro;* en la práctica se emplea un múltiplo, el *kilográmetro,* que vale evidentemente 10^5 gramos-centímetro.

OBSERVACIÓN I. — Se ve que el par y el trabajo, que están medidos ambos por el producto de una fuerza y una longitud, están expresados en la misma unidad. Para distinguirlos entre sí hemos llamado a la uni-

dad de par, *gramo-centímetro-par,* y a la unidad de trabajo, *gramo-centímetro.*

OBSERVACIÓN II. — Cuando un cuerpo, una polea por ejemplo, sometido a la acción de un par C, gira de un cierto ángulo α, el par produce un trabajo. Este trabajo tiene por valor el producto del par por el ángulo de que el cuerpo ha girado, es decir:

$$\mathcal{T} = C\alpha,$$

estando medido α en radiantes, o sea por la longitud del arco cuyo radio es la unidad, comprendido entre sus lados. Cuando la polea ha dado una vuelta completa, $\alpha = 2\pi$ y $\mathcal{T} = C \times 2\pi$; cuando la polea ha dado n vueltas, el trabajo efectuado es:

$$\mathcal{T} = C \times 2\pi n = C \times 2 \times 3{,}1416 \times n,$$

y este número estará expresado en kilográmetros si C está expresado también en kilográmetros-par.

5.ª POTENCIA. — La potencia de una máquina es, por definición, el trabajo realizado por esta máquina en la unidad de tiempo. En el sistema que estamos estudiando, la unidad de potencia es el *gramo-centímetro por segundo* o su múltiplo el *kilográmetro por segundo.*

En la práctica se emplea otro múltiplo de esta unidad, el caballo de vapor, que vale 75 kilográmetros por segundo.

Si la polea de una máquina está sometida a la acción de un par de C kilográmetros y si da n vueltas por segundo, el trabajo producido por segundo, o sea la potencia desarrollada, es:

$$P = C \times 2\pi n \quad \text{kilográmetros.}$$

Ahora bien, $2\pi n$ es el ángulo de que gira la polea en un segundo, es decir, su velocidad angular;

luego designando por ω esta velocidad angular, tendremos que la potencia desarrollada podrá expresarse del modo siguiente:

$$P = C\,\omega.$$

Sistema cegesimal; C. G. S.: Centímetro — Gramo-masa — Segundo

En el sistema *centímetro — gramo-peso — segundo* que acabamos de estudiar se ha tomado como unidad fundamental una unidad de fuerza, definida por la atracción que ejerce la tierra sobre un cierto cuerpo, depositado en los archivos nacionales. Ahora bien, esta unidad no cumple con la condición esencial de ser la misma en todos los lugares, porque si se lleva este patrón (o una de sus copias) a diferentes puntos de la tierra, la fuerza de atracción que se ejercerá sobre él será diferente en cada uno de estos puntos, aumentando a medida que se lleva del ecuador hacia los polos. Por consiguiente se imponía sustituir este sistema, empleado hasta 1881, por otro sistema en que la unidad de *fuerza* estuviera sustituída por otra unidad. Esta otra unidad es la unidad de *masa,* pues en efecto, la masa de un cuerpo, tal como la hemos definido, conserva el mismo valor, cualquiera que sea el lugar en que se encuentre, deduciéndose fácilmente el valor de la unidad de fuerza.

Este nuevo sistema es el sistema *centímetro — gramo-masa — segundo,* que se designa con el nombre de *sistema cegesimal,* y se le representa por las letras *C. G. S.*

Unidades fundamentales. — Las unidades fundamentales de este sistema son: *unidad de longitud,* el *centímetro,* que es la centésima parte del metro patrón;

unidad de masa, el *gramo-masa,* que es la milésima parte de la masa de un kilogramo patrón; *unidad de tiempo,* el *segundo,* que es la 86400.ª parte del día solar medio.

Unidades derivadas. — Todas las demás unidades se deducen de las tres fundamentales, para lo cual demostraremos que existe una cierta relación entre una magnitud cualquiera y las tres magnitudes: longitud, masa y tiempo. Para ello, representemos estas tres magnitudes por L, M y T y cada una de las magnitudes que se estudie por un símbolo particular. La relación que hay entre esta magnitud y las tres dichas se expresa por una igualdad entre sus símbolos, cuya igualdad expresará el modo como puede obtenerse el número que mide la magnitud considerada mediante otros tres números que midan respectivamente una longitud, una masa y un tiempo, y con un factor numérico para cada caso.

Esta relación es la *ecuación de las dimensiones* de la magnitud.

1.ª SUPERFICIE **S.** — Una superficie puede siempre expresarse por el producto de dos longitudes y por un factor numérico que depende de la forma de su contorno. Por ejemplo, la superficie de un triángulo sabemos que es: $\frac{1}{2}$ altura $\times$ base; la superficie de un círculo es: 3,1416 $\times$ radio $\times$ radio, etc. La ecuación de las dimensiones de una superficie es, por consiguiente:

$$S = L \times L, \qquad \text{o sea:} \qquad S = L^2.$$

Unidad C. G. S.: el *centímetro cuadrado,* que es la superficie de un cuadrado de 1 centímetro de lado.

2.ª VOLUMEN **Vol.** — Un volumen puede siempre

expresarse por el producto de tres longitudes y de un factor numérico.

La ecuación de las dimensiones de un volumen es:

$$Vol. = L \times L \times L, \qquad \text{o sea:} \qquad Vol. = L^3.$$

Unidad C. G. S.: el *centímetro cúbico,* que es el volumen de un cubo de 1 centímetro de arista.

3.ª Velocidad **V.** — La velocidad de un móvil animado de un movimiento uniforme se obtiene dividiendo el número que mide la longitud del camino recorrido por el número que mide el tiempo empleado en recorrerlo. Se puede decir, por consiguiente, que una velocidad es el resultado de dividir una longitud por un tiempo, siendo la ecuación de sus dimensiones:

$$V = \frac{L}{T}, \qquad \text{o sea:} \qquad V = LT^{-1}.$$

La *unidad C. G. S. de velocidad* es la velocidad de un móvil que recorre con movimiento uniforme 1 centímetro por segundo. Esta unidad no tiene nombre especial, designándosela por: *centímetro por segundo.*

4.ª Aceleración **A.** — La aceleración de un móvil animado de un movimiento uniformemente acelerado es el aumento de velocidad que toma el móvil en la unidad de tiempo. Por consiguiente, se obtendrá la aceleración midiendo el incremento de la velocidad en un tiempo dado; el cociente de los dos números que miden respectivamente el incremento de la velocidad y el tiempo, dará el valor de la aceleración. Ahora bien, un incremento de velocidad, que es una diferencia entre dos velocidades, es también una velocidad; luego puede decirse que una aceleración es el cociente de una velocidad por un tiempo:

$$A = \frac{V}{T}$$

Pero hemos visto que $V = \frac{L}{T}$; por consiguiente, la ecuación de las dimensiones de una aceleración es:

$$A = \frac{L}{T^2}, \quad \text{o sea:} \quad A = LT^{-2}.$$

Es decir, que una aceleración es el cociente de una longitud por el cuadrado de un tiempo.

La *unidad C. G. S. de aceleración* es la aceleración de un móvil animado de un movimiento uniformemente acelerado cuya velocidad aumenta durante un segundo en 1 centímetro por segundo.

Se designa con el nombre de *centímetro por segundo por segundo*.

5.ª FUERZA **F.** — Hemos visto que si se aplica una fuerza F a un cuerpo de masa M, este cuerpo toma un movimiento uniformemente acelerado, cuya aceleración A está dada por la relación:

$$(1) \qquad \frac{F}{A} = M, \quad \text{de donde:} \quad F = MA.$$

Por consiguiente, se puede decir que una fuerza es el producto de una masa por una aceleración. Ahora bien, acabamos de ver que $A = \frac{L}{T^2}$, luego la ecuación de las dimensiones de una fuerza es:

$$F = \frac{ML}{T^2}, \quad \text{o sea:} \quad F = LMT^{-2}.$$

Esta relación se expresa diciendo que una fuerza es el producto de una masa por una longitud, dividido por el cuadrado de un tiempo.

Unidad C. G. S. de fuerza. — Si en la relación (1) se hace $M = 1$ y $A = 1$, se tiene $F = 1$; por consiguiente:

La unidad *C. G. S.* de fuerza es la fuerza que aplicada a un cuerpo cuya masa es de 1 gramo-masa, le comunica una aceleración de 1 centímetro por segundo por segundo. Esta unidad ha recibido el nombre de *dina.*

Comparación entre 1 dina y 1 gramo-peso. — Consideremos un cuerpo cuya masa es de 1 gramo-masa; se sabe que en París la tierra ejerce sobre este cuerpo una fuerza de atracción de 1 gramo-peso y que si se abandona a sí mismo toma un movimiento uniformemente acelerado, siendo la aceleración de 981 centímetros por segundo por segundo. Por consiguiente, este cuerpo, bajo la acción de una fuerza de 1 gramo-peso, adquiere una aceleración de 981 centímetros por segundo por segundo.

El mismo cuerpo, sometido a la acción de una dina, tomaría por definición una aceleración de 1 centímetro por segundo por segundo. Y como las fuerzas aplicadas a un mismo cuerpo son proporcionales a las aceleraciones producidas, el gramo-peso que produce una aceleración 981 veces mayor que la que produciría la dina, es a su vez 981 veces más grande que la dina:

$$1 \text{ } gramo\text{-}peso = 981 \text{ } dinas.$$

6.ª TRABAJO $\mathcal{T}$. — El trabajo está medido por el producto de una fuerza y una longitud. La ecuación de las dimensiones de un trabajo es:

$$\mathcal{T} = F \times L,$$

ahora bien:

$$F = \frac{ML}{T^2},$$

luego:

$$\mathcal{T} = \frac{ML^2}{T^2}, \quad \text{o sea:} \quad \mathcal{T} = ML^2T^{-2}.$$

La *unidad C. G. S. de trabajo* es el trabajo efectuado por una fuerza de 1 *dina* que traslada su punto de aplicación en su propia dirección en 1 *centímetro*. Esta unidad se designa con el nombre de *erg*.

Comparación entre 1 erg y 1 gramo-centímetro. — El gramo-centímetro es el trabajo producido por una fuerza de 1 gramo-peso que traslada su punto de aplicación en su propia dirección en 1 centímetro. Como 1 gramo-peso vale 981 dinas, se tiene:

$$1 \textit{ gramo-centímetro} = 981 \textit{ ergs}$$
$$1 \text{ kilográmetro} = 10^5 \text{ gramos-centímetro;}$$

luego:

$$1 \textit{ kilográmetro} = 981 \times 10^5 = 9{,}81 \times 10^7 \textit{ ergs.}$$

7.ª PAR **C.** — El par tiene las mismas dimensiones que el trabajo, según hemos visto, luego tendrá la misma ecuación de las dimensiones:

$$C = \frac{ML^2}{T^2}, \quad \text{o sea:} \quad C = ML^2 T^{-2}.$$

La unidad C. G. S. de par es el erg-par, teniéndose:

$$1 \text{ gramo-centímetro-par} = 981 \text{ ergs-par}$$
$$1 \text{ kilográmetro-par} = 9{,}81 \times 10^7 \text{ ergs-par.}$$

El trabajo producido por un par C que ha girado del ángulo α, tiene por valor $C\alpha$ ergs, si C está expresado en *ergs-par*.

8.ª POTENCIA **W.** — La potencia de una máquina es el trabajo que efectúa esta máquina en la unidad de tiempo, por consiguiente está medida por el cociente de un trabajo por un tiempo:

$$W = \frac{\mathcal{T}}{T},$$

pero:

$$\mathcal{C} = \frac{ML^2}{T^2};$$

luego:

$$W = \frac{ML^2}{T^3} = ML^2T^{-3}.$$

La *unidad C. G. S. de potencia* es la potencia de una máquina que efectúa un trabajo de un erg en un segundo. Esta unidad no tiene nombre especial y se la designa por: *erg por segundo.*

Según lo dicho anteriormente:

1 gramo-centímetro por segundo = 981 ergs por segundo
1 kilográmetro por segundo = 981×10^7 ergs por segundo
1 cab. de vapor = $75 \times 9,81 \times 10^7 = 736 \times 10^7$ ergs por seg.

Unidades prácticas de fuerza, par, trabajo y potencia.—Si se emplearan las unidades que hemos definido, los números que medirían las magnitudes mecánicas ordinariamente utilizadas en la práctica serían tan grandes que se entorpecerían y dificultarían los cálculos que se tuvieran que hacer.

Se han adoptado los siguientes múltiplos de las unidades C. G. S.:

Unidad práctica de Fuerza .	kilogramo = 981 000 dinas
» » » Trabajo .	joule = 10^7 ergs
» » » Par . .	joule-par = 10^7 ergs-par
» » » Potencia.	watt = 10^7 ergs por segundo

En el cuadro siguiente está resumido todo lo expuesto sobre unidades mecánicas, y permite pasar fácilmente de uno a otro sistema de unidades.

MAGNITUDES	UNIDADES EN EL SISTEMA Centímetro—Gramo-peso—Segundo	UNIDADES en el sistema C. G. S.	UNIDADES prácticas derivadas del sistema C. G. S.	RELACIONES entre las tres unidades
Fuerza.	Gramo-peso. Múltiplo: kilogramo.	Dina	»	1 gramo-peso = 981 dinas. 1 kilogramo = 981000 dinas.
Trabajo.	Gramo-centímetro. Múltiplo: kilográmetro.	Erg	Joule (10^7 ergs)	1 gramo-centímetro = 981 ergs. 1 kilográmetro = $9{,}81 \times 10^7$ ergs. 1 joule = 10^7 ergs. (1 kilográmetro = 9,81 joules)
Par.	Gramo-centímetro-par. Múltiplo: kilográmetro-par	Erg-par	Joule-par (10^7 ergs-par)	(Las mismas relaciones que para el trabajo.)
Potencia.	Gramo-centímetro por segundo. Múltiplos: kilográmetro por segundo. 75 kilográmetros por segundo o caballo de vapor.	Erg por segundo	Watt (10^7 ergs por segundo)	1 gramo-centímetro por seg. = 981 ergs por segundo. 1 kilográmetro por segundo = $9{,}81 \times 10^7$ ergs por segundo. 1 watt = 10^7 ergs por segundo (1 kilográmetro por segundo = 9,81 watts. 1 caballo de vapor = $75 \times 9{,}81$ = 736 watts).

Unidades C. G. S. de las magnitudes eléctricas y magnéticas

Las magnitudes eléctricas y magnéticas están relacionadas con las mecánicas por la ley de Coulomb aplicada a las cantidades de electricidad, o por esta misma ley de Coulomb aplicada a las masas magnéticas.

Según que se adopte una u otra de estas relaciones, se tiene uno de los dos grupos siguientes de unidades, derivados ambos del sistema C. G. S.: las *unidades electrostáticas* y las *unidades electromagnéticas*.

Unidades electrostáticas C. G. S.

1.ª CANTIDAD DE ELECTRICIDAD **Q.**—Sean dos cantidades de electricidad q y q' concentradas en dos puntos situados a una distancia l uno de otro; según la ley de Coulomb, se ejerce entre dichas cantidades una fuerza de atracción o de repulsión dada por la relación:

$$f = \frac{q \times q'}{l^2}.$$

Si estas dos cantidades son iguales se tiene:

$$f = \frac{q^2}{l^2},$$

de donde:

(1) $$q^2 = f \times l^2 \quad \text{y} \quad q = l\sqrt{f}\cdot$$

Si se hace $l = 1$ y $f = 1$ se tiene $q = 1$, por consiguiente:

La unidad electrostática C. G. S. de cantidad

de electricidad es la cantidad de electricidad que, situada a 1 centímetro de distancia de una cantidad igual a sí misma, ejerce sobre ésta una fuerza de 1 dina.

Ecuación de las dimensiones.—Hemos visto que la ecuación de las dimensiones de una fuerza es:

$$F = LMT^{-2}$$

$$\sqrt{F} = \sqrt{LMT^{-2}}, \qquad \sqrt{F} = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

Ahora bien, según la relación (1), una cantidad de electricidad es el producto de una longitud por la raíz cuadrada de una fuerza, luego:

$$Q = L \times L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}, \qquad \text{o sea:} \qquad Q = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

En esta igualdad se ve que la cantidad de electricidad está relacionada con las magnitudes longitud, masa y tiempo.

2.ª Intensidad de corriente **I.**—La intensidad de una corriente es la cantidad de electricidad transportada en la unidad de tiempo por esta corriente.

La unidad electrostática C. G. S. de intensidad, es la intensidad de una corriente que transporta una unidad electrostática de cantidad de electricidad en un segundo.

Ecuación de las dimensiones.—Una corriente I transporta en el tiempo T una cantidad de electricidad Q tal, que:

$$I = \frac{Q}{T}.$$

Pero hemos visto que:

$$Q = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$$

luego:

$$I = \frac{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}}{T}, \qquad \text{o sea:} \qquad I = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}.$$

3.ª DIFERENCIA DE POTENCIAL O FUERZA ELECTROMOTRIZ **V.** — La potencia desarrollada en un circuito recorrido por una corriente I, bajo una diferencia de potencial V entre sus extremos, tiene por valor:

$$(2) \qquad W = V \times I, \qquad \text{de donde:} \qquad V = \frac{W}{I}.$$

Si $W = 1$ e $I = 1$, se tiene $V = 1$. Por consiguiente: *La unidad electrostática C. G. S. de diferencia de potencial o de fuerza electromotriz, es la diferencia de potencial que existe entre los extremos de un circuito recorrido por una corriente igual a la unidad electrostática C. G. S. de corriente y en la cual la corriente produce una potencia de 1 erg por segundo.*

Ecuación de las dimensiones. — Sabemos que:

$$W = L^2 M T^{-3} \qquad \text{e} \qquad I = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2},$$

luego:

$$V = \frac{L^2 M T^{-3}}{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}}, \qquad \text{o sea:} \qquad V = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1},$$

4.ª RESISTENCIA **R.** — La resistencia está relacionada con la diferencia de potencial y la corriente por la ley de Ohm:

$$R = \frac{V}{I}.$$

De esta relación se deduce fácilmente la definición de la unidad *C. G S.* de resistencia, de modo análogo

a como se ha hecho para las otras magnitudes eléctricas.

Ecuación de las dimensiones.— Expresando en la relación precedente, la corriente y la diferencia de potencial, por sus dimensiones, se tiene:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}}{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}},$$

o sea:

$$R = L^{-1} T.$$

Se sabe que la ecuación de las dimensiones de una velocidad es $\frac{L}{T} = L T^{-1}$, luego una resistencia tiene en el sistema electrostático las dimensiones de la inversa de una velocidad, pues, en efecto, $L^{-1} T$ puede escribirse $\frac{T}{L}$ ó $1 : \frac{L}{T}$.

5.ª Capacidad C.— Cuando se unen las dos armaduras de un condensador de capacidad C a los polos de un generador que mantiene una diferencia de potencial V, este condensador adquiere, como veremos más adelante, una carga:

$$Q = C V,$$

de donde:

$$C = \frac{Q}{V}.$$

Las dimensiones de Q y de V son:

$$Q = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}, \qquad V = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

luego:

$$C = \frac{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}}{L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}},$$

o sea:

$$C = L.$$

Una capacidad tiene, pues, en unidades electrostáticas, las mismas dimensiones que una longitud.

Se dice que es homogénea a una longitud y por consiguiente se expresa en centímetros.

Se sabe que la capacidad de un condensador plano cuyas armaduras tienen una superficie S y en que la capa de aire que hace de dieléctrico tiene un espesor e, tiene por valor:

$$C = \frac{S}{4 \pi e}.$$

Una capacidad está medida por el cociente de una superficie por una longitud, es decir, que es una longitud.

Observación. — Se podría también determinar las ecuaciones de las dimensiones de las magnitudes magnéticas expresadas en unidades electrostáticas, pero estas determinaciones no tienen interés práctico suficiente para que nos detengamos en su estudio.

Unidades electromagnéticas C. G. S. de las magnitudes eléctricas y magnéticas

Masa magnética **M.** — La ley de Coulomb aplicada a las masas magnéticas da, como hemos visto para las cantidades de electricidad:

$$m = L \sqrt{F}.$$

La unidad electromagnética C. G. S. de masa magnética es la masa que, actuando sobre una masa idéntica a ella situada a 1 centímetro de distancia, la repele con una fuerza de 1 dina.

Ecuación de las dimensiones. — La ecuación de las dimensiones de una masa magnética en el sistema electromagnético es evidentemente la misma que la ecuación de las dimensiones de una cantidad de electricidad en unidades electrostáticas, es decir:

$$m = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

CAMPO MAGNÉTICO $\mathcal{H}$. — Se sabe que si una masa magnética m se encuentra en un campo de intensidad $\mathcal{H}$, se ejerce sobre esta masa una fuerza:

$$F = \mathcal{H} \times m.$$

La *unidad electromagnética de campo* es por lo tanto un campo tal que sobre una masa magnética igual a la unidad electromagnética de masa, ejerce una fuerza de 1 dina.

Ecuación de las dimensiones. —

$$\mathcal{H} = \frac{F}{m} = \frac{LMT^{-2}}{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}}$$

$$\mathcal{H} = L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

FLUJO MAGNÉTICO Φ. — El flujo a través de una espira que limita una superficie S situada en un campo uniforme de intensidad $\mathcal{H}$ y orientada normalmente a la dirección del campo tiene por valor:

$$\Phi = \mathcal{H} \times S.$$

De donde se deduce la unidad electromagnética de flujo.

Ecuación de las dimensiones.—

$$\Phi = L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} \times L^2$$

$$\Phi = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

FUERZA ELECTROMOTRIZ O DIFERENCIA DE POTENCIAL **V.**—Se sabe que la fuerza electromotriz inducida en un circuito situado en un campo magnético tiene por valor el cociente de la variación del flujo a través del circuito por la duración de esta variación.

Ecuación de las dimensiones.— Una fuerza electromotriz está dada por el cociente de un flujo por un tiempo, es decir:

$$V = \frac{\Phi}{T} = \frac{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}}{T}$$

$$V = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}.$$

INTENSIDAD DE CORRIENTE **I.** — *Ecuación de las dimensiones.*—La intensidad de una corriente está relacionada con la fuerza electromotriz del modo siguiente:

$$V \times I = \text{potencia}; \qquad VI = W$$

$$I = \frac{W}{V} = \frac{L^2 M T^{-3}}{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}}$$

$$= L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

CANTIDAD DE ELECTRICIDAD **Q.** — *Ecuación de las dimensiones.*—Se sabe que $Q = IT$, luego:

$$Q = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} \times T$$

$$Q = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}.$$

RESISTENCIA **R.**—*Ecuación de las dimensiones.*—

$$R = \frac{V}{I},$$

es decir:

$$R = \frac{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}}{L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}} = L\,T^{-1}.$$

Se sabe que la ecuación de las dimensiones de una velocidad es también LT^{-1} cociente de una longitud por un tiempo. Se expresa este hecho diciendo que en las unidades electromagnéticas una resistencia es homogénea a una velocidad, pudiéndose expresar una resistencia en centímetros por segundo.

CAPACIDAD **C.** — *Ecuación de las dimensiones.* — Se sabe que $Q = C \times V$:

$$C = \frac{Q}{V},$$

o sea:

$$C = \frac{L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}}{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}}, \qquad C = L^{-1}\,T^{2}.$$

COEFICIENTE DE AUTO-INDUCCIÓN $\mathcal{L}$.— *Ecuación de las dimensiones.* — El coeficiente de auto-inducción

de un circuito es el cociente del flujo Φ, que produce a través de este circuito una corriente I que lo recorre, por esta corriente:

$$\mathcal{L} = \frac{\Phi}{I} = \frac{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}}{L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}}$$

$$\mathcal{L} = L.$$

Por consiguiente, el coeficiente de auto-inducción en unidades electromagnéticas es homogéneo a una longitud y se expresa en centímetros.

OBSERVACIÓN.—El empleo de uno u otro de los dos grupos de unidades cegesimales, electrostáticas y electromagnéticas, sólo influye en los números que miden magnitudes eléctricas o magnéticas. Una magnitud mecánica está medida evidentemente por el mismo número en ambos sistemas.

Relaciones entre las unidades electrostáticas y las unidades electromagnéticas de las diferentes magnitudes eléctricas y magnéticas

Estas relaciones se deducen del valor del cociente entre los números que miden una misma cantidad de electricidad en unidades electrostáticas y en unidades electromagnéticas. El valor de este cociente ha sido determinado por Maxwell en sus notables estudios sobre los fenómenos electromagnéticos [1].

[1] Estos estudios han sido la base de la teoría de la propagación electromagnética de la luz y dieron lugar a las investigaciones de Hertz que condujeron al descubrimiento de la telegrafía sin hilos.

Maxwell ha demostrado que si una misma cantidad de electricidad está medida por q unidades electrostáticas y por q' unidades electromagnéticas, se tiene:

$$\frac{q}{q'} = 3 \times 10^{10}.$$

Este número 3×10^{10} es en unidades C. G. S. el valor de la velocidad de la luz. En efecto, se sabe que en un segundo la luz recorre 300000 kilómetros, o sea:

$$300000 \times 100000 = 3 \times 10^{10} \text{ centímetros.}$$

Este es el número v *de Maxwell.*

Ahora bien, puesto que el número que mide una cierta cantidad de electricidad en U. E. S. (1) es v veces mayor que el número que mide la misma cantidad en U. E. M., se podrá escribir:

1 U. E. M. *de cantidad de electricidad* = v U. E. S.

Para determinar las relaciones que existen entre las dos unidades E. S. y E. M. de otras magnitudes eléctricas, bastará, según la observación hecha anteriormente, buscar una relación entre ellas, bien directamente o por intermedio de una magnitud mecánica.

INTENSIDAD DE CORRIENTE. — La intensidad de corriente está unida a la cantidad de electricidad por la relación:

$$I = \frac{Q}{T} \cdot$$

Sean:

I_1 y Q_1 una intensidad y una cantidad de electricidad expresadas en U. E. M.

I_2 y Q_2 sus valores en U. E. S.

(1) De aquí en adelante representaremos las «unidades electrostáticas» y las «unidades electromagnéticas» por sus respectivas abreviaturas *U. E. S.* y *U. E. M.*

La unidad C. G. S. de tiempo T tiene el mismo valor en U. E. S. que en U. E. M.

Se tiene por consiguiente:

$$I_1 = \frac{Q_1}{T}, \qquad I_2 = \frac{Q_2}{T}$$

y:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad \text{y como} \quad Q_1 = v\, Q_2,$$

se tiene:

$$I_1 = v\, I_2,$$

es decir, que

1 U. E. M. *de corriente* $= v$ U. E. S.

Diferencia de potencial. — La diferencia de potencial V está relacionada con la corriente I del modo siguiente:

$$VI = W, \quad \text{o sea} \quad V = \frac{W}{I}, \quad W = \text{potencia.}$$

Sean:

I_1 y V_1 una corriente y una dif. de pot. expresadas en U. E. M.

I_2 y V_2 sus valores en U. E. S.

Siendo W la unidad de potencia, tiene el mismo valor en los dos sistemas, y se tendrá:

$$V_1 = \frac{W}{I_1} \qquad V_2 = \frac{W}{I_2},$$

de donde:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Pero $I_1 = v\, I_2$, luego:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{v} \quad \text{y} \quad V_1 = \frac{1}{v}\, V_2.$$

Es decir, que:

$$1 \text{ U. E. M. } \textit{de diferencia de potencial} = \frac{1}{v} \text{ U. E. S.}$$

CAPACIDAD. — La capacidad C de un condensador está relacionada del modo siguiente con la diferencia de potencial V, bajo la cual se carga, y con la cantidad de electricidad Q, que adquiere:

$$Q = C \times V; \qquad \text{de donde,} \qquad C = \frac{Q}{V}.$$

Sean:

Q_1 y V_1 una cantidad de electricidad y una dif. de pot. expresadas en U. E. M.
Q_2 y V_2 sus valores en U. E. S.
C_1 la capacidad del condensador expresada en U. E. M.
C_2 su valor en U. E. S.

Se tiene:

$$C_1 = \frac{Q_1}{V_1} \qquad C_2 = \frac{Q_2}{V_2},$$

de donde:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \times \frac{V_2}{V_1};$$

ahora bien:

$$Q_1 = v\, Q_2, \qquad V_1 = \frac{1}{v} V_2,$$

luego:

$$\frac{C_1}{C_2} = v \times v = v^2, \qquad C_1 = v^2 \times C_2.$$

Es decir, que:

$$1 \text{ U. E. M. } \textit{de capacidad} = v^2 \text{ U. E. S.}$$

Del mismo modo se vería que:

$$1 \text{ U. E. M. } \textit{de resistencia} = \frac{1}{v^2} \text{ U. E. S}$$

Unidades prácticas de las magnitudes eléctricas. Unidades prácticas internacionales

Si se expresaran las cantidades eléctricas que se emplean ordinariamente en la práctica, en U. E. S. o en U. E. M., resultarían números o excesivamente grandes o exageradamente pequeños, lo cual sería de una gran dificultad para los cálculos. Ha sido preciso, para las necesidades de la práctica, formar otro sistema de unidades, adoptado según el Congreso internacional de electricistas efectuado en Chicago en 1893. Estas unidades, llamadas *Unidades prácticas internacionales,* se emplean en todos los países.

Se deducen estas unidades de las U. E. M. y están definidas partiendo de una unidad de cantidad de electricidad y de una unidad de diferencia de potencial, tomadas arbitrariamente.

UNIDAD DE CANTIDAD DE ELECTRICIDAD.—La unidad de cantidad de electricidad es el *coulomb,* definido del modo siguiente:

1 *coulomb* $= \frac{1}{10}$ ó 10^{-1} *unidad electromagnética de cantidad de electricidad.*

UNIDAD DE DIFERENCIA DE POTENCIAL.—La unidad de diferencia de potencial es el *volt,* definido del modo siguiente:

1 *volt* $= 10^8$ *unidades electromagnéticas de d. d. p.*

Las otras magnitudes eléctricas se definen por las

relaciones que hay entre ellas y las dos precedentes (cantidad de electricidad y diferencia de potencial), directamente o por intermedio de magnitudes mecánicas, como hemos visto al pasar de las U. E. S. a las U. E. M.

Intensidad de corriente.—Se tiene entre la intensidad de corriente I, la cantidad de electricidad Q y el tiempo T, la relación:

$$I = \frac{Q}{T}.$$

Sean:

I', Q' una corriente y una cantidad de electricidad expresadas en U. E. M.
I'', Q'' sus valores en unidades prácticas.

El tiempo T tiene el mismo valor, expresado en U. E. M. y en unidades prácticas, por consiguiente:

$$\frac{I'}{I''} = \frac{Q'}{Q''}.$$

Ahora bien, hemos dicho que $Q'' = 10^{-1} Q'$, luego:

$$I'' = 10^{-1} I'.$$

O sea, que:

1 unidad práctica de intensidad de corriente $= 10^{-1}$ U. E. M.

Esta unidad ha recibido el nombre de *ampere;* por consiguiente:

1 *ampere* $= \frac{1}{10}$ ó 10^{-1} U. E. M. *de intensidad de corriente,*

luego 1 U. E. M. de corriente = 10 amperes.

RESISTENCIA.—Entre la resistencia R, la diferencia de potencial V y la intensidad de corriente I, se tiene la relación:

$$R = \frac{V}{I};$$

razonando como en el caso precedente y teniendo en cuenta que:

1 unidad práctica de d. d. p. $= 10^8$ U. E. M.
1 » » » corriente $= 10^{-1}$ »

se tendrá que:

1 unidad práctica de resistencia =

$$= \frac{10^8}{10^{-1}} = 10^8 \times 10 = 10^9 \text{ U. E. M.}$$

Esta unidad se llama *ohm;*

1 *ohm* $= 10^9$ U. E. M. *de resistencia.*

CAPACIDAD.—La capacidad C está relacionada con la diferencia de potencial y la cantidad de electricidad del modo siguiente:

$$C = \frac{Q}{V}.$$

Ahora bien:

1 unidad práctica de cantidad $= 10^{-1}$ U. E. M.
1 » » » d. d. p. $= 10^8$ »

por consiguiente:

$$1 \text{ unidad práctica de capacidad} = \frac{10^{-1}}{10^8} = \frac{1}{10^9} \text{ U. E. M.}$$

Se ha dado a esta unidad el nombre de *farad;*

1 *farad* $= 10^{-9}$ U. E. M.

COEFICIENTE DE AUTO-INDUCCIÓN. —Sabemos que si un circuito tiene un coeficiente de auto inducción $\mathcal{L}$ y si la corriente que lo recorre varía de i durante el tiempo t, se produce en este circuito una fuerza electromotriz V dada por la relación:

$$V = \mathcal{L} \frac{I}{T} \qquad \text{(pág. 224)},$$

de donde:

$$\mathcal{L} = \frac{V}{I} \times T.$$

Ahora bien:

1 unidad práctica de f. e. m. o d. d. p. $= 10^8$ U. E. M.
1 » » » corriente $= 10^{-1}$ »

la unidad de tiempo es la misma en los dos sistemas, luego:

1 unidad de coeficiente de auto-inducción $=$

$$= \frac{10^8}{10^{-1}} = 10^8 \times 10 = 10^9 \text{ U. E. M.}$$

Esta unidad ha recibido el nombre de *henry;*

$$1 \textit{ henry} = 10^9 \text{ U. E. M.}$$

Todo lo dicho referente a unidades eléctricas se resume en el cuadro siguiente:

Magnitudes eléctricas

MAGNITUDES	ECUACIONES DE LAS DIMENSIONES U. E. S.	ECUACIONES DE LAS DIMENSIONES U. E. M.	RELACIONES entre la unidad E. S. y la unidad E. M. ($v = 3 \times 10^{10}$)	UNIDADES PRÁCTICAS internacionales		
Cantidad de electricidad.	$L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}$	1 U. E. M. $= v$ U. E. S.	Coulomb.	1 coulomb	$= 10^{-1}$ U. E. M.
Intensidad de corriente . .	$L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}$	$L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	1 » $= v$ »	Ampere.	1 ampere	$= 10^{-1}$ »
Diferencia de potencial o fuerza electromotriz . .	$L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$	$L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}$	1 » $= \frac{1}{v}$ »	Volt.	1 volt	$= 10^{8}$ »
Resistencia . .	$L^{-1} T$	$L T^{-1}$	1 » $= \frac{1}{v^2}$ »	Ohm.	1 ohm	$= 10^{9}$ »
Capacidad. . .	L	$L^{-1} T^{2}$	1 » $= v^2$ »	Farad.	1 farad	$= 10^{-9}$ »
Coeficiente de auto-inducción		L		Henry.	1 henry	$= 10^{9}$ »

Para las magnitudes magnéticas no se han tomado unidades diferentes de las U. E. M. Estas magnitudes se expresan siempre en U. E. M.

Ejemplo.—Determinar la superficie de las armaduras de un condensador plano cuyo dieléctrico tiene un espesor de aire de 0,5 milímetro, para que su capacidad sea de $\frac{1}{10}$ de microfarad.

Sea S esta superficie. Se sabe que la capacidad de un condensador plano está dada por la relación:

$$C = \frac{S}{4\pi e},$$

siendo e el espesor de la capa de aire.

Si S y e están expresados en centímetros cuadrados y centímetros respectivamente, es decir, en unidades C. G. S., la capacidad C estará también expresada en unidades C. G. S., y como la relación precedente se ha obtenido por medio de la ley de Coulomb aplicada a las cantidades de electricidad, el valor de C resultante estará expresado en U. E. S.

Expresemos, por consiguiente, $\frac{1}{10}$ de microfarad en U. E. S.

$$1 \text{ microfarad} = 10^{-6} \text{ farad} \quad \text{o bien} \quad \frac{1}{10^6} \text{ farad}$$

$$1 \text{ farad} = 10^{-9} \text{ U. E. M. de capacidad, o sea } \frac{1}{10^9} \text{ U. E. M.}$$

Luego la capacidad del condensador es:

$$\frac{1}{10} \times \frac{1}{10^6} = \frac{1}{10^7} \text{ farad},$$

o sea:

$$\frac{1}{10^7} \times \frac{1}{10^9} = \frac{1}{10^{16}} \text{ U. E. M. de capacidad;}$$

ahora bien:

$$1 \text{ U. E. M. de capacidad} = v^2 \text{ U. E. S.}$$
$$1 \text{ U. E. M.} \quad \text{»} \quad = 9 \times 10^{20} \text{ U. E. S.}$$

luego:

$$C = \frac{1}{10^{16}} \times 9 \times 10^{20} = 9 \times 10^4 \text{ U. E. S.}$$

Por lo tanto se habrá de tener:

$$\frac{S}{4\pi \frac{0,5}{10}} = 9 \times 10^4, \quad \text{o sea,} \quad \frac{10\,S}{2\pi} = 9 \times 10^4,$$

de donde:

$$S = 2\pi \times 9 \times 10^8 = 56548 \text{ centímetros cuadrados.}$$

CAPÍTULO XI

Nociones sobre los voltímetros y amperímetros

Los voltímetros y amperímetros son aparatos muy empleados en la industria para medir diferencias de potencial e intensidades de corrientes.

Están formados en esencia por circuitos recorridos por corrientes proporcionales a los voltajes o a las intensidades que se quieren medir.

Bajo la influencia de estas corrientes, una parte móvil queda sometida a la acción de un par electrodinámico y se mueve. Todo está dispuesto de modo que este movimiento desarrolla un par antagonista, de manera que la parte móvil toma una posición de equilibrio que depende del valor de la corriente. Una aguja unida a esta parte móvil indica sobre una graduación el voltaje o la intensidad que se quiere medir.

El circuito de un voltímetro tiene una gran resistencia; en efecto, si R es su resistencia, la corriente que pasa por él es $i = \frac{u}{R}$, siendo u el voltaje medido. Como la desviación debe siempre producirse por una corriente muy débil, es preciso que R sea muy grande.

Supongamos que se quiere medir la diferencia de potencial entre dos puntos A y B de un conductor cuya resistencia entre esos puntos es r, y sea I la

corriente que lo recorre: hay que hallar el valor de *r I* (fig. 180). Cuando se intercala el voltímetro entre estos dos puntos, una parte *i* de la corriente *I* pasa por el voltímetro y entonces la corriente en *AB* es $I' = I - i$; por consiguiente, el voltímetro indicará el valor $r(I - i)$ y no *r I*, siendo el error *ri*. Para que este error sea muy pequeño es preciso que *i* sea muy pequeño y por tanto la resistencia *R* del voltímetro muy grande.

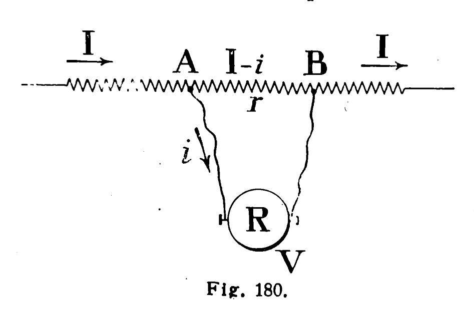


Fig. 180.

Además, es fácil ver que si *R* tuviera un valor no muy grande, los dos puntos entre los cuales se quiere medir el voltaje estarían en corto-circuito por el voltímetro.

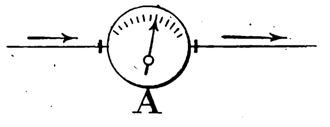


Fig. 181.

En cambio, el amperímetro debe presentar muy poca resistencia al paso de la corriente (fig. 181).

Estos aparatos se clasifican en tres grupos:

1.° Voltímetros y amperímetros electro-magnéticos;

2.° Voltímetros y amperímetros de imán fijo y cuadro móvil.

3.° Voltímetros y amperímetros térmicos.

1.° Voltímetros y amperímetros electro-magnéticos. — Están fundados en la atracción de un núcleo de hierro dulce por un solenoide recorrido por una

corriente. Se llaman *aperiódicos* cuando están provistos de amortiguadores destinados a limitar las oscilaciones de la parte móvil a un lado y a otro de su posición de equilibrio. El sentido de desviación de la aguja es independiente del sentido de la corriente.

Las divisiones del cuadrante frente al cual se mueve la aguja no son equidistantes, porque los movimientos del hierro dulce en el solenoide no son proporcionales a la corriente que pasa por éste.

Estos aparatos se emplean cuando no se necesita una gran precisión: son muy duraderos y funcionan con mucha regularidad.

Como el sentido en que se desvía la aguja es independiente del de la corriente, pueden utilizarse estos aparatos para medir voltajes e intensidades de corrientes alternas; pero, en este caso, la graduación no es exactamente la misma que para voltajes y corrientes continuas, a menos que se adopten disposiciones especiales.

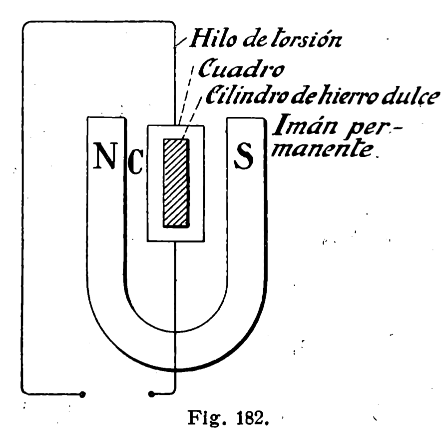


Fig. 182.

2.° Voltímetros y amperímetros de imán fijo y cuadro móvil.—Están fundados en la acción que ejerce un campo magnético sobre un cuadro recorrido por una corriente.

El *galvanómetro Deprez y d'Arsonval* es el tipo de estos aparatos. Se compone de un cuadro *C* suspendido por un hilo de torsión en el plano del campo de

un imán permanente NS. En el interior del cuadro hay un cilindro de hierro dulce cuyo efecto es aumentar el flujo a través del plano de las espiras (fig. 182).

Cuando entra una corriente por el hilo de torsión y pasa por el cuadro, éste tiende a moverse perpendicularmente al campo y está sometido a un par. Pero, en

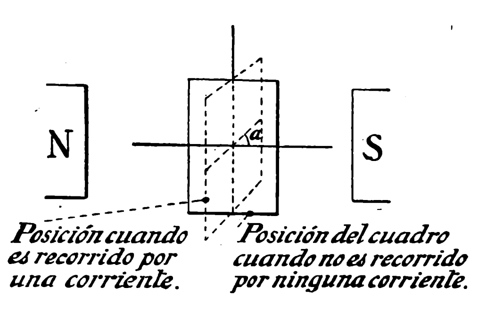


Fig. 183.

su rotación, se tuerce el hilo de torsión, originando un par antagonista, y el cuadro toma una posición de equilibrio cuando estos dos pares son iguales (fig. 183).

Sea a el ángulo de que ha girado el cuadro, que es el mismo que el ángulo que se ha torcido el hilo.

Hemos visto (pág. 233) que el campo ejerce sobre el cuadro un par cuyo valor es:

$$C = \mathcal{H} sni \cos a.$$

Además, se demuestra que el par de torsión desarrollado por un hilo es proporcional al ángulo de torsión si este ángulo es pequeño.

Es decir, que este par es de la forma $C' = Ka$, y en la posición de equilibrio se tiene:

$$C = C',$$

o sea:

$$\mathcal{H} sni \cos a = Ka,$$

de donde:

$$i = \frac{K}{\mathcal{H}'sn} \times \frac{a}{\cos a};$$

ahora bien, cuando el ángulo de que gira el cuadro es muy pequeño, condición que siempre se debe verificar, la cantidad $\frac{a}{\cos a}$ puede sustituirse por a, sin error apreciable, por tender $\cos a$ hacia la unidad, y se tiene:

$$i = K' a,$$

es decir, que la corriente es proporcional al ángulo de que gira el cuadro. Se comprende fácilmente que este aparato puede servir para medir intensidades de corrientes.

Si se quiere utilizar como voltímetro, será preciso acoplarle en serie una gran resistencia, y como sufre desviaciones muy grandes bajo la influencia de corrientes muy débiles, del orden de la milésima de ampere, y aun menos, será necesario en general derivar una parte de la corriente, shuntándolo con una resistencia conveniente (fig. 184). La desviación, para una misma resistencia en serie y un mismo shunt, será proporcional al voltaje aplicado; bastará determinar de una vez para siempre, por medio de un voltaje conocido, el número de divisiones correspondientes a un volt para tener un voltímetro.

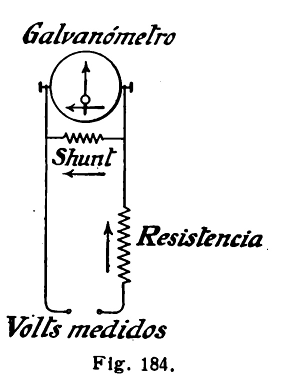


Fig. 184.

Para utilizar el galvanómetro como amperímetro no se le puede intercalar directamente en el circuito

recorrido por la corriente que hay que medir, por ser esta corriente demasiado grande en la mayoría de los casos. Pero se hace pasar la corriente por una resistencia exactamente conocida y se pone el galvanómetro entre los extremos de esta resistencia (fig. 185). Si I es la corriente que hay que medir y R la resistencia empleada, hay entre sus extremos una diferencia de potencial igual a $R\,I$,

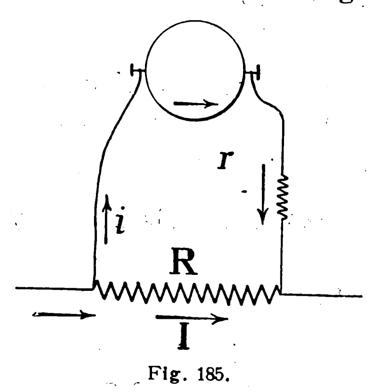


Fig. 185.

de modo que si r es la resistencia total del circuito incluso el galvanómetro, por éste pasará una corriente i cuyo valor será:

$$i = \frac{RI}{r},$$

de donde:

$$I = \frac{r}{R}\,i.$$

Por consiguiente, si r y R son constantes, se ve que I es proporcional a i y por lo tanto a la desviación producida. De este modo se podrá, por medio de una corriente de intensidad conocida, determinar el número de divisiones correspondientes a un ampere, y se tendrá un amperímetro.

Los voltímetros y amperímetros de cuadro móvil son galvanómetros montados como acabamos de ver. Pero generalmente el par antagonista, en vez de estar producido por un hilo de torsión, está originado por un muelle en espiral.

Siendo proporcionales las desviaciones a las corrientes que pasan por el circuito móvil, las divisiones de la graduación son equidistantes si el campo en que el circuito se mueve es uniforme.

EJEMPLO. — *Voltímetro y amperímetro Chauvin y Arnoux.* — El cuadro móvil está formado por espiras circulares que forman un anillo de hilos colocado entre dos anillos de cobre (fig. 186).

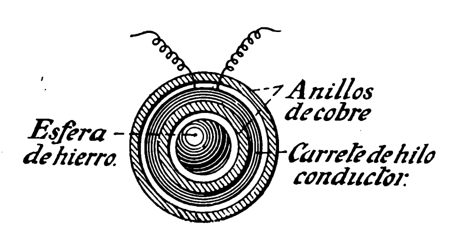


Fig. 186.

Uno de los extremos del hilo que constituye el cuadro está unido a uno de los bornes del aparato, y el otro a una resistencia fija unida a su vez al segundo borne. Este cuadro está situado entre las piezas polares de un potente imán circular (fig. 188) y puede oscilar alrededor de un eje perpendicular a la dirección del campo, y su movimiento desarrolla un par antagonista por medio de un muelle en espiral (fig. 187).

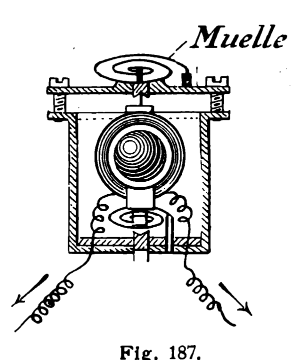


Fig. 187.

En el interior del cuadro hay una esfera de hierro dulce que refuerza el campo en esta región, desempeñando el mismo papel que el cilindro de hierro en el galvanómetro Deprez y d'Arsonval.

El objeto de los anillos de cobre que limitan el cuadro es hacer que el aparato sea aperiódico, es decir, oponerse a sus oscilaciones. En efecto, cuando

bajo la influencia de la corriente el cuadro ha recibido una impulsión, sale de su posición de equilibrio y no vuelve a la misma hasta después de un cierto número de oscilaciones.

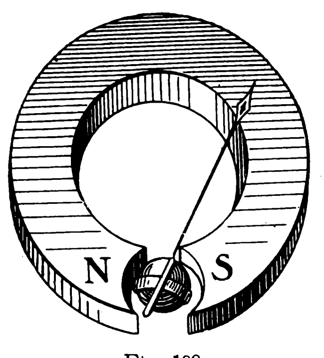


Fig. 188.

Ahora bien, estas oscilaciones producen en los anillos de cobre corrientes de Foucault que, según la ley de Lenz, se oponen a esos movimientos, de modo que el campo de imán juega respecto a los anillos de cobre que se mueven, el mismo papel que un medio viscoso.

Voltímetros de varios alcances.—Para poder medir con un mismo aparato y con una aproximación conveniente voltajes de órdenes de magnitud muy diferentes, se hace uso de los voltímetros de varios alcances.

Estos voltímetros tienen un borne + y varios bornes —; enfrente de cada uno de estos últimos hay inscrito un número, por ejemplo: 3, 75, 150, 300 (figs. 189 y 190).

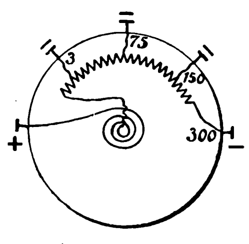


Fig. 189.

Entre el borne + y uno de los bornes — se encuentran el cuadro móvil y una resistencia fija, tanto más grande cuanto mayor es el número inscrito frente a este borne —. Estas resistencias son tales, que si se aplica entre el borne + y un borne — un voltaje igual al número inscrito frente a este último, se obtiene una desviación igual a toda la graduación de la escala. Supongamos que la escala tenga, por ejemplo, 150 divisiones; cuando se emplea el borne 75,

con 75 volts, la aguja recorre toda la escala, o sea 150 divisiones, luego una división representa

$$\frac{75}{150} = \frac{1}{2} \text{ volt.}$$

Con el borne 3 y con 3 volts la aguja recorre todas las 150 divisiones, y una división representa $\frac{3}{150}$, o sea $\frac{1}{50}$ de volt.

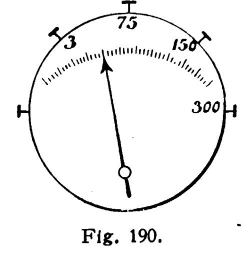


Fig. 190.

Amperímetros con shunts. — Los amperímetros con shunts sirven para medir con un mismo aparato intensidades de órdenes de magnitud muy diferentes y con una aproximación conveniente.

Los shunts se disponen en el circuito recorrido por la corriente que se trata de medir, del mismo modo que vimos al emplear el galvanómetro como amperímetro (fig. 191). Los shunts son resistencias rigurosamente conocidas y construídas con gran precisión; el valor de estas resistencias varía con el orden de magnitud de la corriente que hay que medir. Sobre estos shunts hay inscritos unos números tales como 1 ampere, 19 amperes, 30 amperes, etc. Esto significa que si, por ejemplo, se emplea el shunt marcado con 30 amperes, una corriente de 30 amperes

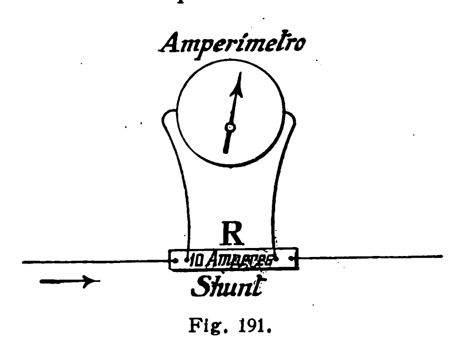


Fig. 191.

que pase por él dará las 100 divisiones de la escala del amperímetro para el cual ha sido construído, de modo que cada división representará $\frac{30}{100} = \frac{3}{10}$ de ampere. Con el shunt de 10, cada división representará 0,1 de ampere, etc.

Los amperímetros Chauvin y Arnoux están generalmente construídos de manera que una corriente de 0,05 ampere produce una desviación igual a las 100 divisiones de la graduación; su resistencia interior es de 0,8 ohm.

Determinemos cuál ha de ser la resistencia del shunt de 10 amperes, por ejemplo. Esta resistencia tiene que ser tal, que una corriente de 10 amperes que la atraviese dé las 100 divisiones, es decir, produzca en el amperímetro colocado entre sus extremos una corriente de 0,05 ampere.

Sea R esta resistencia: cuando es recorrida por 10 amperes, hay entre sus extremos una diferencia de potencial de

$$R \times 10 \text{ volts},$$

y como la resistencia del amperímetro es 0,8 ohm, la corriente en su circuito móvil es:

$$\frac{R \times 10}{0{,}8}.$$

Pero esta corriente ha de ser igual a 0,05, luego:

$$\frac{R \times 10}{0{,}8} = 0{,}05,$$

de donde:

$$R = \frac{0{,}05 \times 0{,}8}{10} = 0{,}004 \text{ ohm},$$

o sea, en microhms,

$$R = 0{,}004 \times 10^6 = 4000 \text{ microhms.}$$

3.° Voltímetros y amperímetros térmicos.—Se sabe que si un hilo de resistencia R es recorrido por una corriente I, la cantidad de calor producida en esta resistencia tiene por valor RI^2 joules por segundo, o sea $RI^2 \times 0{,}24$ calorías. Bajo la influencia de estas calorías la longitud del hilo aumenta, y estas variaciones de longitud pueden servir para medir la corriente que por él pasa. Este hilo, que en esta clase de aparatos es muy fino, no puede soportar más que corrientes de muy poca intensidad, de modo que al utilizarlo como amperímetro hay que ponerlo en derivación entre los extremos de un shunt; si se emplea como voltímetro, se pone en serie con una resistencia bastante grande.

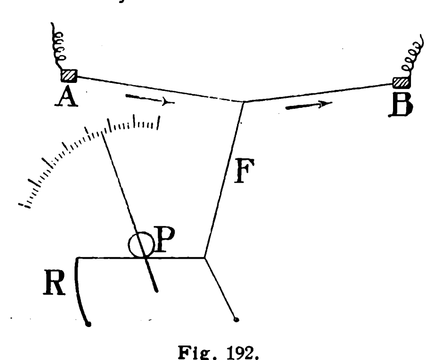


Fig. 192.

Las variaciones de longitud del hilo son amplificadas y transmitidas a una aguja que se mueve frente a una escala graduada (fig. 192).

Las desviaciones son aproximadamente proporcionales a los cuadrados de las corrientes que pasan por el hilo. Estos aparatos son aperiódicos y la aguja llega muy lentamente a su posición de equilibrio; tienen el inconveniente de que absorben una cantidad considerable de energía.

Las partes de que consta este aparato son:

AB, hilo dilatable (aleación de platino y plata) que es recorrido por la corriente;

F, hilo de latón;

R, muelle;

P, polea.

Al pasar la corriente, el hilo AB se alarga y es estirado por el muelle R, produciéndose la desviación de la aguja.

CAPÍTULO XII

Generadores mecánicos de electricidad; máquinas dinamo-eléctricas

Las máquinas dinamo-eléctricas, o simplemente *dinamos,* son máquinas en las que por medio de un trabajo mecánico se producen variaciones de flujo a través de espiras conductoras llamadas espiras inducidas, convenientemente arrolladas.

Las corrientes inducidas que así se producen se utilizan en un circuito exterior llamado circuito de utilización.

Hay máquinas que dan en el circuito exterior corrientes continuas, y otras, corrientes alternas; a estas últimas máquinas, es decir, a las que dan corrientes alternas, se las llama *alternadores.* Por ahora sólo estudiaremos las dinamos o máquinas de corriente continua.

Constitución de una dinamo. — Una máquina de corriente continua se compone esencialmente de tres partes:

1.ª El *sistema inductor,* destinado a producir un flujo magnético a través de las espiras inducidas;

2.ª El *inducido,* que es el conjunto de espiras inducidas;

3.ª El *colector,* que permite recoger las corrien-

tes inducidas para hacerlas pasar por un circuito exterior, por medio de tomas de corriente o *escobillas* que se apoyan sobre él.

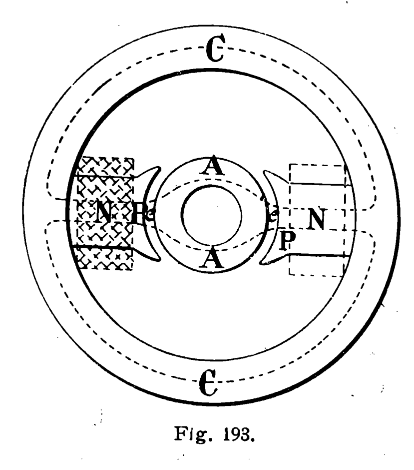


Fig. 193.

I. Sistema inductor. — El sistema inductor está formado por un circuito magnético y por espiras inductoras arrolladas sobre una o varias partes de este circuito; estas espiras, al ser recorridas por una corriente, producen la fuerza magnetomotriz que da origen al flujo inductor.

El circuito magnético representado esquemáticamente en las figuras 193 y 194 comprende:

1.° La culata *C*;

2.° Los núcleos *N*, *N*;

3.° Las piezas polares *P*, *P*;

4.° La armadura o núcleo inducido *A*, cilindro de hierro dulce sobre el cual se arrollan las espiras inducidas;

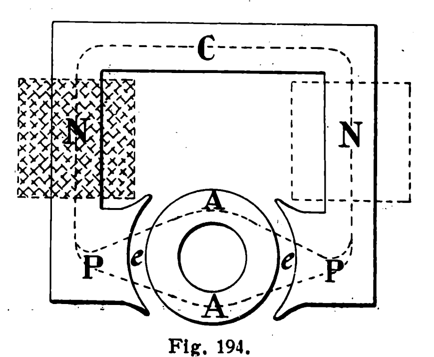


Fig. 194.

5.° El entrehierro *e*, espacio de aire que hay entre las piezas polares y la superficie exterior de la armadura.

Cuando el circuito magnético no tiene más que dos piezas polares, la máquina se llama bipolar; si tiene un número mayor de piezas polares se llama multipolar.

La fuerza magnetomotriz está producida por espiras arrolladas sobre los núcleos y recorridas por una corriente llamada corriente inductriz o de excitación; el valor de la fuerza magnetomotriz es:

$$\mathcal{E} = 1{,}25\, ni,$$

siendo n el número de espiras e i la corriente inductriz. Por consiguiente, si $\mathcal{R}$ es la reluctancia del circuito magnético, el flujo que lo atraviesa es:

$$\Phi = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{R}}.$$

Flujo útil.— Todo el flujo producido por la fuerza magnetomotriz no atraviesa las espiras inducidas: un cierto número de líneas de fuerza se derivan entre varios puntos del circuito magnético constituyendo así una pérdida de flujo (fig. 195).

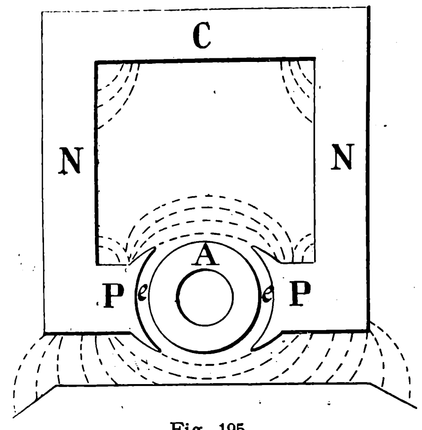


Fig. 195.

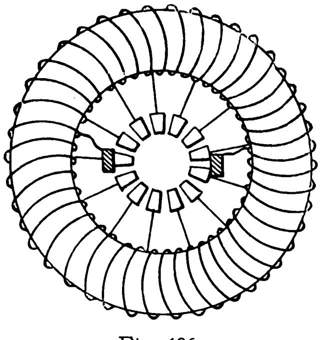
Se llama flujo útil al flujo que atraviesa el núcleo de la armadura, pudiéndose escribir:

$$\text{flujo útil} = \text{flujo total} \times K,$$

siendo K un coeficiente menor que la unidad, llamado coeficiente de Hopkinson. El valor de este coeficiente varía con la forma de las máquinas.

II. Inducido.— El inducido está formado por un cierto número de espiras arrolladas sobre el núcleo A, formando un circuito completamente cerrado sobre sí

mismo. Estas espiras están divididas en varias secciones y los puntos comunes a dos secciones consecutivas están unidos a una lámina del colector.


Fig. 196.

III. Colector. — Está formado por un conjunto de láminas de cobre aisladas entre sí y unidas de modo que constituyen un cilindro; este cilindro está montado sobre el mismo árbol que el inducido y muy bien aislado (fig. 196).

Teoría elemental de la dinamo

I. Máquina bipolar. — a) *Sentido de la corriente inducida en una espira.* — Consideremos una espira que se mueve alrededor del cilindro C en el sentido de la flecha F, siendo NS la dirección del flujo inductor (fig. 197). Este flujo, al penetrar en la armadura se divide en dos partes, de modo que si el flujo útil total emitido por un polo es Φ, el cilindro es atravesado en ambas partes del eje NS de las piezas polares, por el flujo $\frac{\Phi}{2}$.

Cuando la espira considerada pasa de la posición (1) a la posición (2), el flujo que la atraviesa pasa del valor 0 al valor $\frac{\Phi}{2}$: en efecto, en la posición (1) el plano de la espira es paralelo a las líneas de fuerza y por lo tanto no corta a ninguna de ellas; al contrario, en la posición (2) su plano es perpendicular a las líneas de fuerza y el flujo que la atraviesa es máximo. Por consiguiente, el flujo aumenta y se produce en la

espira una corriente inducida de sentido negativo; aplicando la regla del sacacorchos, se ve que el sentido positivo sobre la espira es el de la flecha f'_1, y por lo tanto el sentido de la corriente está dado por el de la flecha f_1.

Cuando la espira pasa de la posición (2), el sentido positivo no varía, por ser siempre la misma la direc-

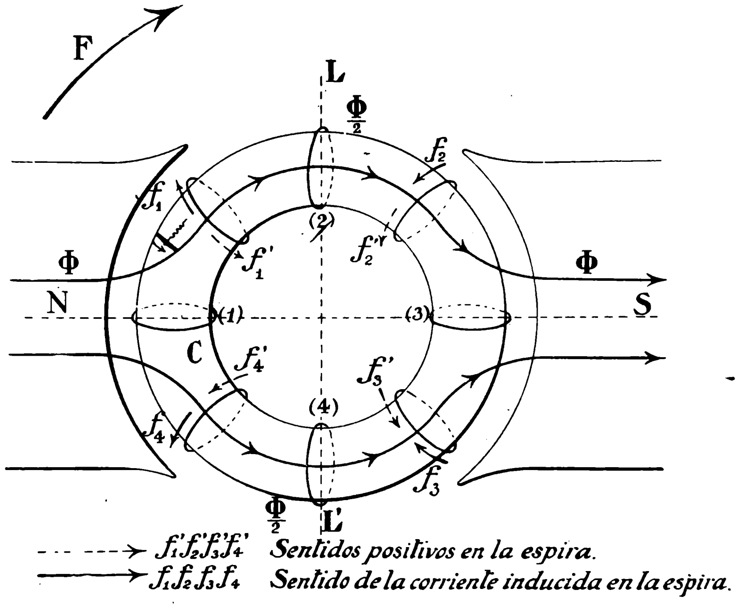


Fig. 197.

ción de las líneas de fuerza, pero el flujo a través de la espira va disminuyendo desde $\frac{\Phi}{2}$ hasta 0 y la corriente inducida tiene el sentido positivo f_2, inverso del anterior f_1.

A partir de la posición (3), cambia el sentido de las líneas de fuerza que cortan el plano de la espira; el sentido positivo sobre esta espira es, desde la posi-

ción (3) hasta la posición (1), inverso del sentido que tenía anteriormente de (1) a (3).

Ahora bien, de (3) a (4), el flujo aumenta desde 0 hasta $\frac{\Phi}{2}$ y la corriente inducida es de sentido negativo f_3, que es el mismo que el de la corriente inducida que recorre la espira cuando pasa de (2) a (3).

Cuando pasa de la posición (4) y va desde (4) hasta (1), el sentido positivo sobre la espira es el mismo, pero el flujo que antes aumentaba, disminuye ahora de $\frac{\Phi}{2}$ a 0, y la corriente tiene el sentido f_4 inverso del precedente f_3, siendo este sentido f_4 el mismo que cuando la espira pasaba de (1) a (2).

Se ve, pues, que la corriente inducida que recorre la espira conserva el mismo sentido durante todo el tiempo que se mueve a la izquierda de la línea LL' perpendicular al eje NS, llamándose a esa línea LL' *línea neutra;* análogamente, mientras se mueve la espira a la derecha de esta línea, la corriente conserva el mismo sentido, que es opuesto al anterior.

Por consiguiente, cada vez que la espira pasa por la línea neutra LL', cambia de sentido la corriente inducida.

b) *Variaciones de la fuerza electromotriz inducida en la espira durante una rotación.* — Al girar la espira alrededor del cilindro C se produce en ella una fuerza electromotriz, que tiene el mismo sentido que la corriente inducida y un valor determinado para cada una de sus posiciones; este valor es máximo cuando pasa la espira por las posiciones (1) y (3), y es nulo cuando pasa por la línea neutra, es decir, en (2) y (4).

En efecto, en las posiciones (2) y (4) (fig. 198) el plano de la espira es perpendicular a la dirección de

las líneas de fuerza, el flujo que la atraviesa es máximo, y se demuestra que cuando el flujo a través de un conductor cerrado pasa por un máximo, la fuerza electromotriz inducida en el conductor es nula.

Es fácil comprender que para estas posiciones, la espira se mueve casi paralelamente a sí misma durante un período de tiempo muy corto, y la variación de flujo y por consiguiente la fuerza electromotriz inducida es nula; además, es evidente que la fuerza electromotriz no puede cambiar de sentido sin anularse; por esta razón se llama línea neutra a la línea LL', que es donde se verifican estos cambios de sentido.

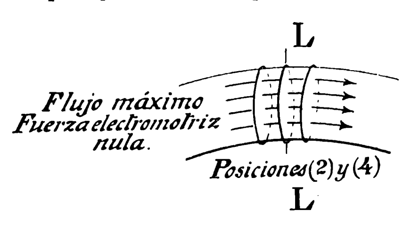


Fig. 198.

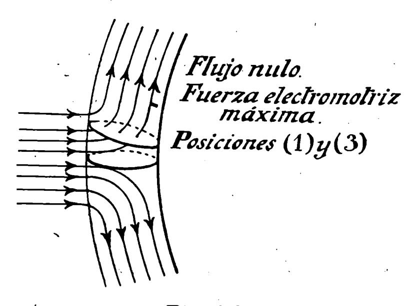


Fig. 199.

Cuando la espira ocupa una de las posiciones (1) o (3), su plano es paralelo a la dirección de las líneas de fuerza y el flujo que la atraviesa es nulo (fig. 199). Al girar la espira de un ángulo muy pequeño, este flujo toma un valor determinado, de modo que durante un período de tiempo muy corto se produce una variación de flujo y por consiguiente una fuerza electromotriz.

Se comprende con facilidad y se puede demostrar exactamente, que para estas dos posiciones la fuerza electromotriz inducida es máxima.

En resumen: cuando la espira pasa de (1) a (2), la fuerza electromotriz va disminuyendo desde un valor máximo hasta 0; en (2), cambia de sentido y su valor va aumentando desde 0 hasta el mismo valor máximo que tenía en (1); de (2) a (3), conserva el mismo sen-

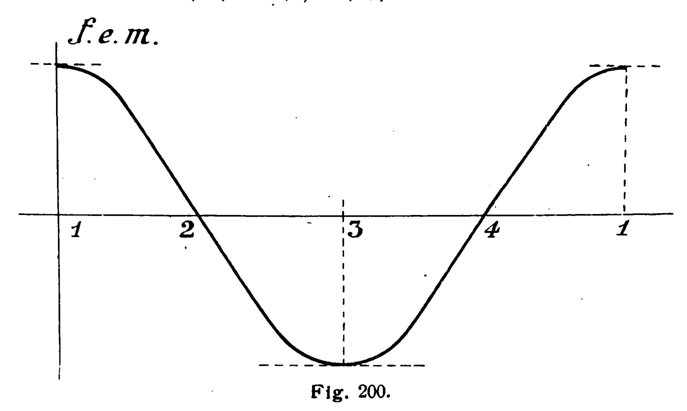


Fig. 200.

tido, hasta (4), pero decrece desde ese valor máximo hasta 0; cambia de sentido al pasar por (4) y crece desde 0 hasta su valor máximo.

Las variaciones de la fuerza electromotriz inducida en la espira pueden representarse por una curva (figura 200).

c) *Valor medio de la fuerza electromotriz inducida en la espira.*—Consideremos el movimiento de (1) a (2), cuya duración es de un cuarto de vuelta completa de la espira; el flujo, durante este tiempo, pasa del valor 0 al valor máximo $\frac{\Phi}{2}$; luego la variación de flujo es:

$$\frac{\Phi}{2} - 0 = \frac{\Phi}{2}.$$

Sea N el número de vueltas que da la espira en un segundo; la duración de una vuelta es $\frac{1}{N}$; y la de

la variación $\frac{\Phi}{2}$, es decir, la de un cuarto de vuelta es $\frac{1}{4N}$: el valor medio de la fuerza electromotriz inducida en esta espira es (pág. 215):

$$\frac{\frac{\Phi}{2}}{\frac{1}{4N} \times 10^8} = \frac{2N\Phi}{10^8} \text{ volts.}$$

Observación.—Hemos supuesto que el cilindro de hierro es fijo y que la espira gira alrededor de él: es evidente que todo lo que hemos dicho se aplicaría sin ninguna restricción al caso en que la espira estuviera fija sobre el cilindro y éste girase en las mismas condiciones que la espira.

d) *Arrollamiento completo sobre la armadura.*— Supongamos que la armadura esté completamente

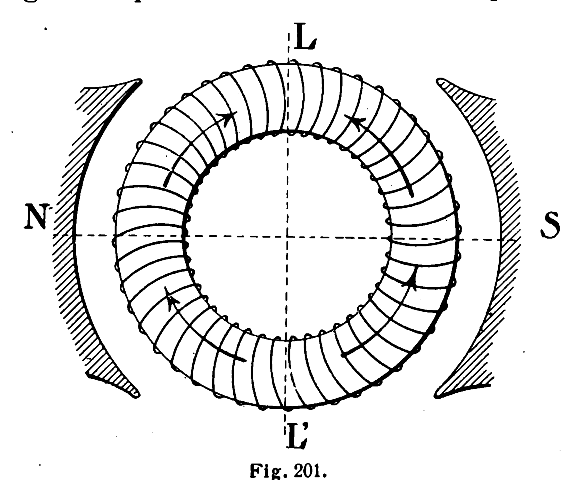


Fig. 201.

rodeada y de un modo continuo por espiras unidas a ella, es decir, que esté rodeada por un conductor arrollado en hélice continua y sin fin (fig. 201).

En cada momento de la rotación se producen en todas las espiras que están a la izquierda de la línea neutra, fuerzas electromotrices del mismo sentido; por consiguiente pueden considerarse dichas espiras como otras tantas pilas montadas en serie; análogamente, las espiras situadas a la derecha se pueden comparar con elementos de pilas acoplados en serie, formando

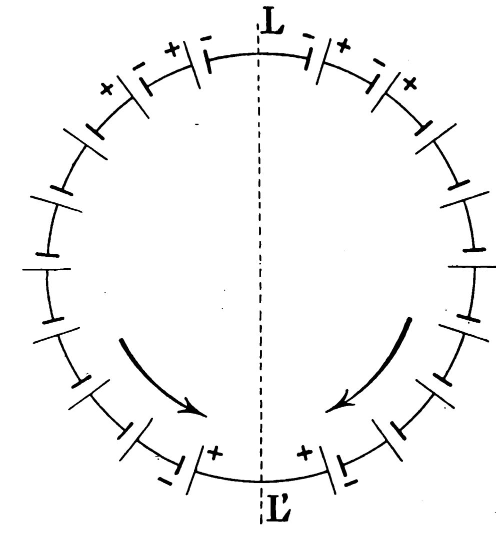


Fig. 202.

un grupo opuesto al primero (fig. 202). Por la simetría de la armadura formada de este modo, es evidente que estos dos grupos son idénticos, y obran como dos pilas idénticas que tuvieran por fuerza electromotriz la suma de las fuerzas electromotrices de los elementos que componen cada uno de ellos y montadas en oposición; en un circuito formado de esta manera, no circula corriente alguna (fig. 203). Si se quiere utilizar en un circuito la energía que estas espiras pueden dar,

bastará unir los conductores que ponen en comunicación los polos del mismo nombre, a los extremos de ese circuito; las dos pilas estarán entonces montadas en paralelo y producirán una corriente en el circuito (figura 204).

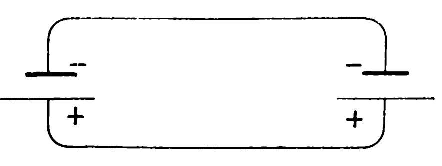


Fig. 203.

Por consiguiente, si las espiras que rodean a la armadura no están unidas a ningún circuito exterior, en cada momento el conjunto de espiras situadas a la izquierda de la línea neutra desarrolla una fuerza electromotriz igual y opuesta a la que desarrolla el conjunto de espiras de la derecha, no circulando ninguna corriente por el circuito. Sólo habría corriente en el caso en que las dos fuerzas electromotrices fueran desiguales, lo cual sería producido por falta de simetría en la máquina, es decir, por un defecto de construcción. Esta corriente, llamada *corriente de circulación,* calentaría el inducido irregularmente y entorpecería el buen funcionamiento de la máquina.

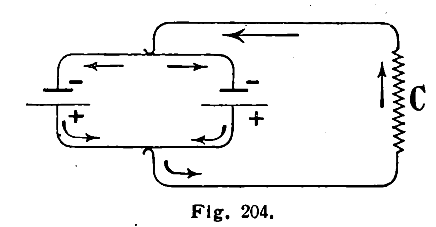


Fig. 204.

Para recoger en un circuito de utilización una corriente engendrada por las fuerzas electromotrices inducidas en las espiras, es preciso que cada vez que dos espiras diametralmente opuestas pasen por la línea neutra, se pongan en contacto con los extremos del circuito.

Se realiza esta condición por medio del colector construído del modo antes indicado: este colector gira

al mismo tiempo que el inducido, y las dos escobillas B, B' permanecen fijas sobre la línea neutra. En la figura 205 se ve claramente el modo de recoger las corrientes inducidas, por medio del colector y de las escobillas.

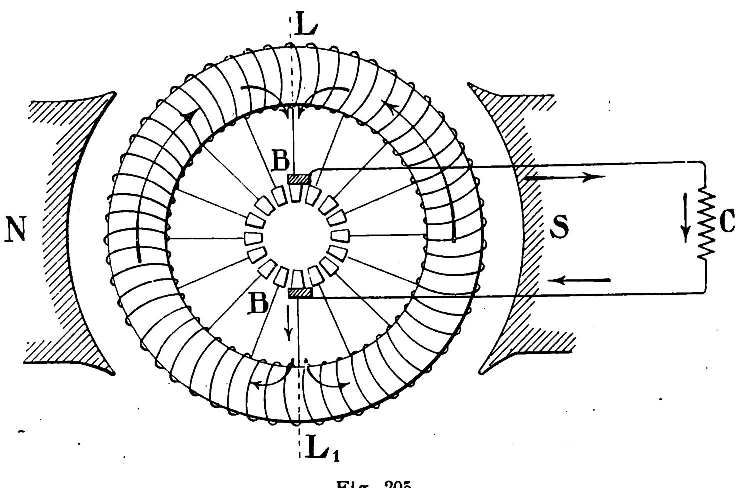


Fig. 205.

e) *Fuerza electromotriz de la dinamo.*—Sea n el número total de espiras inducidas. Hemos visto que están distribuídas en dos grupos de $\frac{n}{2}$ espiras en las que las fuerzas electromotrices inducidas tienen por valor medio $\frac{2N\Phi}{10^8}$ volts, y que las espiras están montadas en serie. La fuerza electromotriz en los extremos de cada uno de estos grupos es, por consiguiente:

$$\frac{2N\Phi}{10^8} \times \frac{n}{2} = \frac{Nn\Phi}{10^8} \text{ volts.}$$

Estos dos grupos están montados en paralelo y su conjunto tiene una fuerza electromotriz igual a la de

uno solo, que es la fuerza electromotriz de la máquina. Luego la fuerza electromotriz de la máquina tiene por valor:

$$E = \frac{N n \Phi}{10^8} \text{ volts.}$$

II. Máquinas multipolares.—Estudiaremos el caso de una máquina con cuatro polos, siendo muy fácil

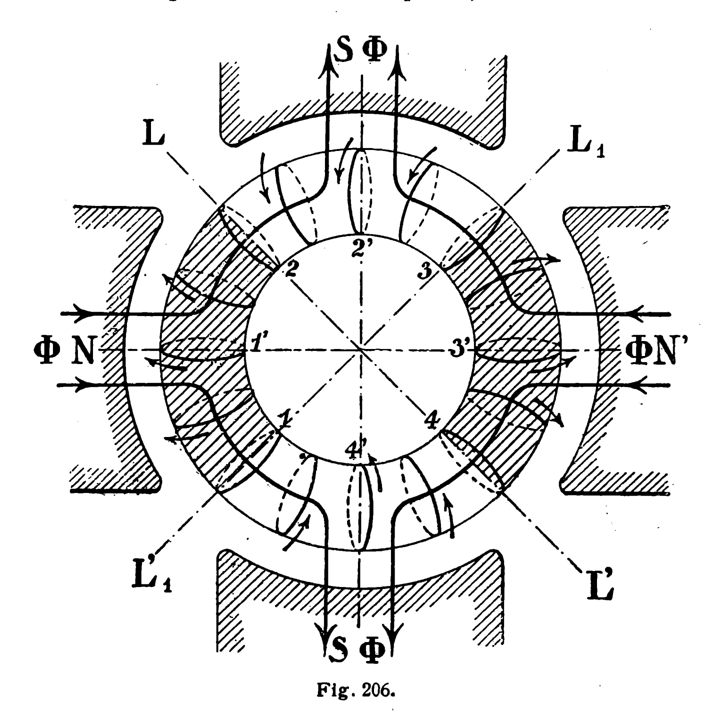


Fig. 206.

generalizar las consecuencias de este estudio al caso de un número cualquiera $2p$ de polos.

a) *Sentido de la corriente inducida en una espira.* —Supongamos una espira que se mueve alrededor del cilindro rodeado de cuatro polos N, S, N', S'. Repitien-

do el mismo razonamiento que hemos hecho al tratar de una máquina bipolar, se ve fácilmente que la corriente inducida en la espira conserva un mismo sentido en cada uno de los intervalos 1-2, 2-3, 3-4 y 4-1, comprendidos entre las dos líneas neutrales LL', $L_1L'_1$, que pasan por entre las piezas polares; la corriente cambia de sentido al pasar la espira por las posiciones 1, 2, 3, 4, que separan a estos intervalos. Por consiguiente, se producen cuatro cambios de corriente al pasar por las líneas neutras (fig. 206).

Si la máquina tuviera $2p$ polos, habría $2p$ cambios de corriente en la espira, que se producirían al pasar por las líneas neutras comprendidas entre las piezas polares.

b) *Valor de la fuerza electromotriz media inducida en la espira.*—Sea Φ el flujo total útil emitido por un polo; cuando la espira pasa de la posición 1′ sobre el eje de un polo, a la posición 2 sobre la línea neutra siguiente, el flujo que la atraviesa varía de 0 a $\frac{\Phi}{2}$ y la duración de esta variación es de $\frac{1}{8}$ de vuelta, o sea de $\frac{1}{8N}$ de segundo, siendo N el número de vueltas por segundo. La fuerza electromotriz media inducida tiene por valor:

$$\frac{\frac{\Phi}{2}}{\frac{1}{8N} \times 10^8} = \frac{4N\Phi}{10^8} \text{ volts.}$$

Si la máquina tuviera $2p$ polos, el valor medio de la fuerza electromotriz inducida en una espira sería:

$$\frac{2pN\Phi}{10^8} \text{ volts.}$$

De donde se deduce que la fuerza electromotriz es proporcional al número de polos, siendo $2p$ veces más grande que la fuerza electromotriz inducida en una espira, que girase en una armazón bipolar con la misma velocidad y para un mismo flujo útil por polo. Se ve, en efecto, que la misma variación de flujo $\frac{\Phi}{2}$ se produce en un tiempo p veces más pequeño en una armazón de $2p$ polos, que en una armazón de dos polos.

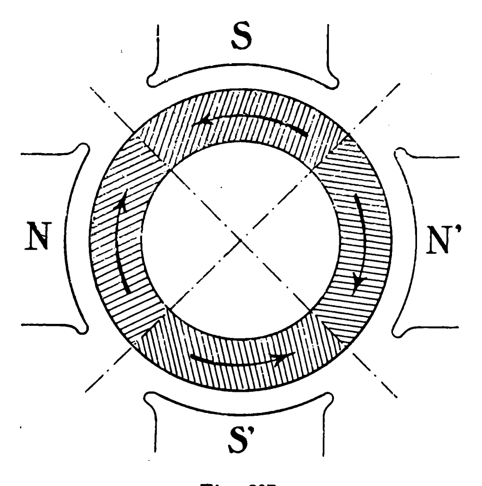


Fig. 207.

c) *Arrollamiento completo sobre la armadura.* — Supongamos que el cilindro esté completamente rodeado por las espiras formando un circuito cerrado sobre sí mismo, y que gire entre los cuatro polos inductores N, S, N', S' (fig. 207). Según hemos visto, en cada momento se producen fuerzas electromotrices alternativamente de signos contrarios con las cuatro partes determinadas por las dos líneas neutras $L_1\ L'_1$ y $L\ L'$ (fig. 206). En cada una de estas partes hay el

mismo número $\frac{n}{4}$ de espiras, agrupadas en serie y en las cuales las fuerzas electromotrices inducidas tienen por valor medio $\frac{4N\Phi}{10^8}$.

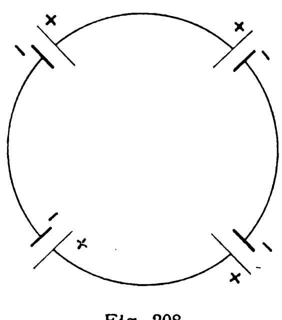


Fig. 208.

El conjunto obra, por consiguiente, como un grupo de cuatro pilas que tuvieran la misma fuerza electromotriz y que estuvieran montadas del modo representado en la figura 208. Si se aplica a este circuito la segunda ley de Kirchhoff, $\Sigma E = \Sigma RI$, se ve que no circula corriente alguna, pues, en efecto, $\Sigma E = 0$, por ser las fuerzas

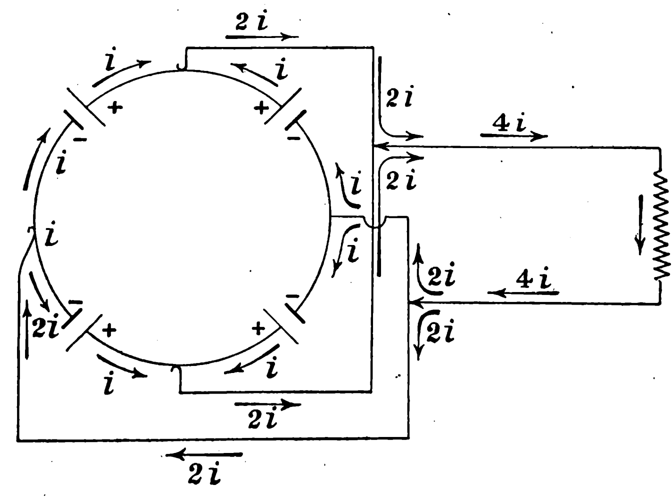


Fig. 209.

electromotrices iguales y alternativamente de sentidos opuestos; luego $RI = 0$ y por consiguiente $I = 0$.

Si se quiere recoger una corriente en un circuito con las pilas agrupadas de este modo, es preciso unir todos los polos + y todos los polos — y conectarlos con los extremos del circuito de utilización como indica la figura 209.

De esta manera las cuatro pilas están montadas en paralelo: si *i* es la corriente producida por cada una

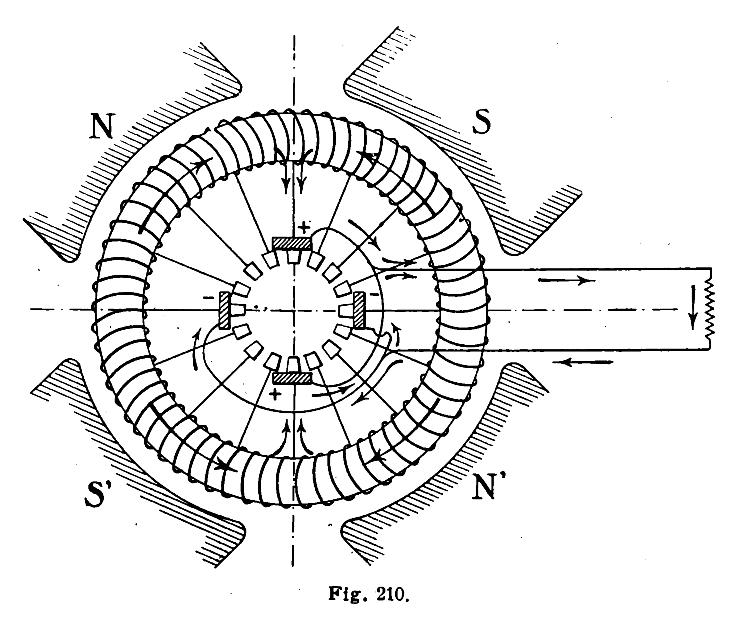


Fig. 210.

de ellas, el circuito de utilización será recorrido por una corriente 4 *i*.

Todo lo dicho referente a este grupo de cuatro pilas se aplica evidentemente al inducido de la dinamo con cuatro polos. Este inducido está formado de cuatro partes en cuyos extremos se producen fuerzas electromotrices inducidas iguales y alternativamente de sentido contrario; por las espiras no pasa corriente alguna si no están unidas a un circuito exterior (fig. 210).

Para recoger la corriente en un circuito de utilización, hay que disponer en el colector cuatro escobillas, dos a dos sobre cada una de las líneas neutras. Dos escobillas opuestas están unidas entre sí por un conductor, constituyendo uno de los polos de la máquina; las otras dos están unidas del mismo modo y forman el otro polo.

Para una máquina de $2p$ polos, es preciso que haya sobre el colector $2p$ escobillas; todas las escobillas están reunidas entre sí alternativamente de dos en dos por coronas metálicas, y dos puntos tomados sobre cada uno de los grupos así formados son los dos polos de la dinamo (fig. 211).

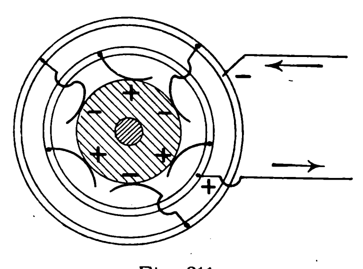


Fig. 211.

d) *Fuerza electromotriz de la dinamo.*— El inducido está, según hemos visto, constituído por cuatro partes idénticas montadas en paralelo; la fuerza electromotriz del conjunto es por consiguiente igual a la de una sola de estas partes. Ahora bien, cada una de estas partes está formada de espiras en que las fuerzas electromotrices inducidas tienen como valor medio $\frac{4N\Phi}{10^8}$ volts.

Si n es el número total de espiras inducidas, cada parte contendrá $\frac{n}{4}$ en serie, y la fuerza electromotriz de cada parte será:

$$E = \frac{4\,N\,\Phi}{10^8} \times \frac{n}{4}, \qquad \text{o sea:} \qquad E = \frac{N\,n\,\Phi}{10^8} \text{ volts,}$$

que es la fuerza electromotriz de la máquina.

Si la máquina tiene $2p$ polos, la fuerza electromotriz media inducida en cada espira es $\frac{2p\,N\Phi}{10^8}$; ahora bien, el inducido está formado de $\frac{2p}{n}$ partes agrupadas en paralelo con n espiras cada parte, luego la fuerza electromotriz de cada parte, y por consiguiente la de la máquina, tiene por valor:

$$E = \frac{2pN\Phi}{10^8} \times \frac{n}{2p},$$

o bien:

$$E = \frac{N n \Phi}{10^8} \text{ volts.}$$

De esta última igualdad se deduce que el valor de E es independiente del número de polos; es decir, que si se hace girar un inducido en armazones de 2, 4, 6,... $2p$ polos, de modo que todos den el mismo flujo útil por polo, la fuerza electromotriz será la misma para una misma velocidad.

Potencia máxima de una dinamo. – Se llama potencia máxima de una dinamo al producto de su fuerza electromotriz por la corriente máxima que puede producir.

Consideremos una dinamo cuya fuerza electromotriz E permanezca constante cualesquiera que sean las condiciones en que funcione, es decir, cualquiera que sea la corriente producida.

Si esta corriente circula por un circuito exterior de resistencia R, su intensidad será en este circuito: $I = \frac{E}{R + r}$, siendo r la resistencia interior de la dinamo. La potencia de la máquina (EI watts) alcanzará

su valor máximo cuando I tenga el mayor valor posible; por consiguiente, esta potencia ha de tener por límite $E \times \frac{E}{r}$, porque al disminuir R hasta 0 se tiene la corriente máxima $I_{máx} = \frac{E}{r}$. La potencia máxima resultante $\frac{E^2}{r}$ sería muy grande, por ser r muy pequeña.

Prácticamente, la potencia que se puede obtener es mucho menor, porque cuando se aumenta la intensidad, aumenta el calentamiento por efecto Joule en el inducido y llega un momento en que la temperatura puede entorpecer el buen funcionamiento de la máquina; el aislador que rodea los conductores se descompone, el cobre puede volatilizarse y los conductores pueden romperse.

De aquí resulta que la potencia producida por una dinamo está limitada por el calentamiento del inducido.

Consideremos un inducido devanado con un hilo cuyo diámetro sea tal que pueda soportar una corriente de I amperes sin calentarse excesivamente.

Hagamos girar este inducido en el interior de una armazón bipolar; sabemos que en este caso el inducido está formado de dos partes montadas en paralelo, y puesto que las espiras pueden soportar una corriente de I amperes, podemos sin peligro obtener una corriente $2I$ en el circuito de utilización, y la potencia máxima de la dinamo será $2\,EI$ watts.

Supongamos que el mismo inducido gira en una armazón de cuatro polos que dan el mismo flujo útil por polo; se sabe que, para una misma velocidad, la fuerza electromotriz tendrá el mismo valor E que en la armazón bipolar. Pero el inducido está ahora compuesto de cuatro partes en paralelo y, como cada una de estas partes puede soportar la corriente I, se podrá

obtener en el circuito exterior una corriente 4 I, y la potencia de la máquina será 4 EI.

En general, si el inducido gira en una armazón de $2p$ polos, la potencia que podrá dar la máquina será $2p\,EI$.

Luego la potencia máxima de una dinamo es proporcional al número de sus polos para un mismo inducido y a igualdad de flujo útil por polo.

Chispas bajo las escobillas. — Inclinación de las escobillas sobre la línea neutra. — Cuando en la rotación de la máquina, una lámina del colector abandona la escobilla sobre la cual acaba de pasar, se produce una chispa si la escobilla está sobre la línea neutra, según hemos supuesto hasta ahora.

Fig. 212.

Para explicar la producción de esta chispa, que tiene efectos destructivos sobre el colector, consideremos dos conductores metálicos A y B puestos en contacto y susceptibles de resbalar uno sobre el otro (figura 212). Sea I una corriente que pasa de uno a otro de estos conductores; en sus puntos de contacto hay una resistencia llamada «resistencia de contacto»; sea r su valor. Estos puntos absorben una potencia cuyo valor es $r\,I^2$ que se transforma en calor, y esta cantidad de calor eleva la temperatura de los conductores tanto más cuanto menor es la superficie común sobre la cual se reparte. Supongamos que vamos separando poco a poco A y B haciendo resbalar uno sobre otro; los puntos de contacto van disminuyendo, la resistencia r aumenta y al mismo tiempo la cantidad de calor rI^2; además, este calor se reparte sobre una superficie cada vez más pequeña, de modo que la ele-

vación de temperatura aumenta considerablemente. En el momento en que termina el contacto, la superficie es muy pequeña y queda reducida sensiblemente a un punto; entonces r es muy grande y la cantidad de calor rI^2 es suficiente para hacer que el metal en el punto de contacto alcance su temperatura de volatilización. Después de la separación, los vapores metálicos establecen una comunicación entre los dos conductores, y esto provoca la chispa que los destruye parcialmente, siendo esta chispa tanto más importante cuanto mayor es la corriente I (fig. 213).

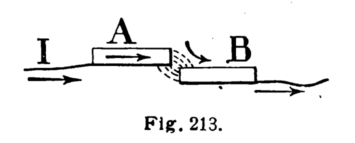


Fig. 213.

Consideremos el momento en que estando la escobilla B sobre la línea neutra, esté en contacto con dos láminas a, a' del colector; la parte S cuyos extremos están unidos a a y a' está en corto-circuito por la escobilla (fig. 214).

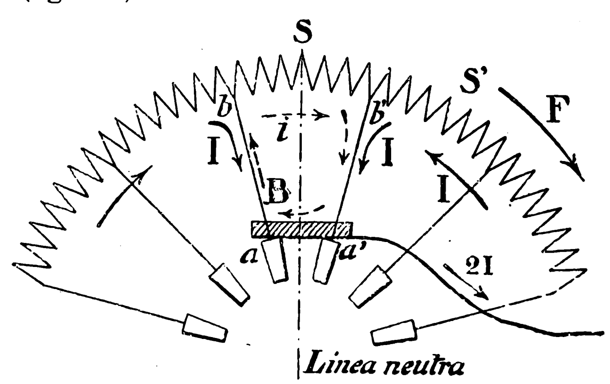


Fig. 214.

Desde luego vemos que en las espiras S no se produce ninguna fuerza electromotriz; las corrientes que llegan por ambos lados de esta parte penetran en la

escobilla por los conductores *ab*, *a'b'*, no pasando ninguna corriente por *S*. Si el inducido gira en el sentido de la flecha *F*, la parte *S* ocupa a continuación la posición *S'*, siendo entonces recorrida por una corriente que crece de 0 a *I*; de aquí resulta en el circuito de poca resistencia *abSb'a'* una corriente de auto-inducción que tiende a oponerse a este crecimiento y que tiene por consiguiente sentido inverso al de *I*. Sea *i*

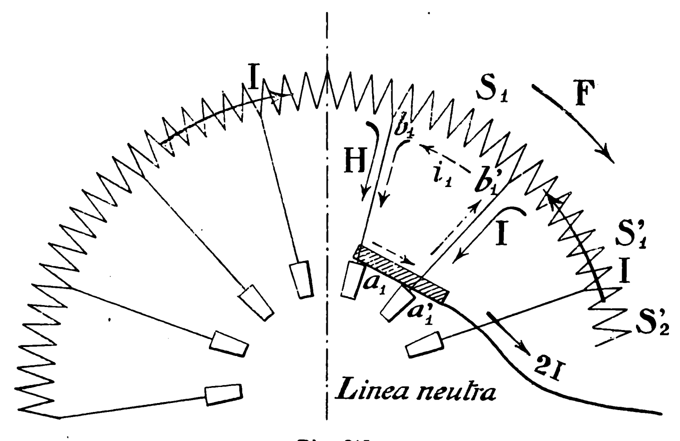


Fig. 215.

esta corriente; bajo la lámina *a'* del colector pasa la corriente $I + i$ que produce la chispa en el momento en que esta lámina deja de estar en contacto con la escobilla.

Se evitan estas chispas inclinando las escobillas sobre la línea neutra en el sentido de la rotación del inducido (fig. 215).

En efecto, en este caso, la parte S_1 puesta en cortocircuito por la escobilla, no estando sobre la línea neutra está en una región en que el flujo que la atraviesa sufre variaciones. Una fuerza electromotriz se produce en esta espira y resulta una corriente local i_1

en el circuito de pequeña resistencia $b_1a_1b'_1S_1$; se ve que la corriente bajo la lámina a'_1 es de sentido contrario a la corriente I, por estar S_1 en una región en que la fuerza electromotriz que se produce en las espiras es del mismo sentido que las producidas en las espiras siguientes S'_1, S'_2,... Al cesar el contacto entre el conductor a'_1 y la escobilla, la corriente es $I - i_1$, y si i_1 es bastante grande, la corriente es muy pequeña y la chispa es insignificante.

OBSERVACIÓN.—Las espiras S_1 puestas en cortocircuito por la escobilla y en las cuales la corriente se encuentra invertida en el momento de pasar sus extremos bajo la escobilla, se llaman *espiras de conmutación.*

La fuerza electromotriz inducida en esta parte y que produce la corriente local i_1 recibe el nombre de *fuerza electromotriz de inversión.*

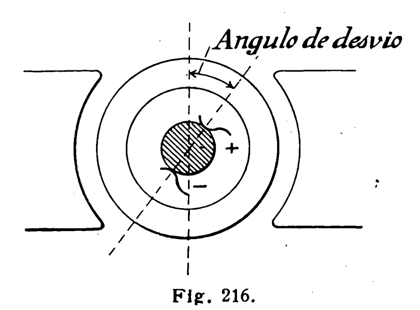


Fig. 216.

Es fácil comprender que corriendo hacia adelante las escobillas, es decir, acercando las espiras de conmutación al eje de los polos, se aumenta la fuerza electromotriz de inversión, puesto que estas espiras se encuentran en una región en que la fuerza electromotriz inducida es mayor.

El ángulo que forma la línea de las escobillas con la línea neutra se llama *ángulo de desvío de las escobillas* (fig. 216).

Variaciones de la fuerza electromotriz de una dinamo con el desvío de las escobillas.—Consideremos, por ejemplo, una máquina bipolar (fig. 217); su

fuerza electromotriz es igual, como ya hemos visto, a la suma algebraica de las f. e. m. inducidas en cada uno de los grupos de espiras que hay entre las escobillas; *B'NB* y *BSB'*. Sea n' el número de espiras comprendidas entre la línea neutra y cada una de las escobi-

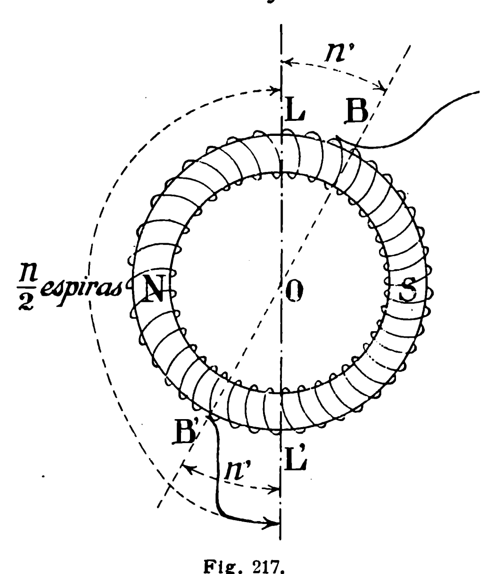


Fig. 217.

llas *B* y *B'*. En el grupo de espiras *B'NB*, por ejemplo, hay $\frac{n}{2} - n'$ espiras en serie cuyas f. e. m. se suman (intervalo *B'NL*) y n' espiras cuyas f. e. m. son opuestas a las precedentes (intervalo *LB*). Por consiguiente, si e es la f. e. m. media inducida en cada espira, la f. e. m. de la dinamo es:

$$\left(\frac{n}{2} - n'\right) e - n'e,$$

o sea:

$$\left(\frac{n}{2} - 2\,n'\right) e,$$

de donde se deduce que, a medida que n' aumenta, es decir, que el desvío de las escobillas aumenta, la fuerza electromotriz disminuye. Si el desvío alcanza el valor de 90°, n' se hace igual a $\frac{n}{4}$, y $\frac{n}{2} - 2n' = 0$, es decir, que la f. e. m. de la máquina es nula.

Causas que hacen variar el desvío de las escobillas. —1.ª *Intensidad de la corriente producida por la máquina.* — Si la corriente I aumenta, habrá que oponer bajo la escobilla una corriente i_1 más grande, es decir, aumentar la fuerza electromotriz de inversión, para lo cual se corren las escobillas hacia adelante.

2.ª *Excitación.* — La chispa de ruptura bajo la escobilla es tanto más grande cuanto mayor es la auto-inducción de la parte en conmutación, y sabemos que esta auto-inducción depende del estado de saturación del núcleo del inducido.

Si la excitación aumenta, el flujo aumenta y al mismo tiempo la inducción del núcleo del inducido; la permeabilidad de este núcleo disminuye y por consiguiente la auto-inducción de las partes del inducido. Por consiguiente, si la excitación aumenta, la misma corriente bajo las escobillas producirá una chispa menor; por lo tanto, no será necesario oponer a la corriente I una corriente i_1 tan intensa, pudiéndose disminuir el desvío de las escobillas.

3.ª *Número de espiras por parte.* — Mientras mayor es el número de espiras por parte, más grande es la auto-inducción de estas partes, y por consiguiente mayor ha de ser el desvío de las escobillas.

4.ª *Resistencia de contacto entre el colector y las escobillas.* — La experiencia y el cálculo demuestran que el desvío es tanto menor cuanto mayor es la resis-

tencia del contacto entre las escobillas y el colector; por esta razón se usan generalmente escobillas de carbón en vez de las metálicas.

Observación. — Se pueden construir máquinas provistas de escobillas de carbón que tengan un número de láminas en el colector bastante grande, es decir, un número bastante pequeño de espiras por parte, para obtener una marcha sin chispas con un desvío casi nulo.

Supresión del desvío de las escobillas. — Se han ideado varios procedimientos para suprimir el desvío de las escobillas: el más sencillo y más generalizado es el que consiste en agregar a la máquina polos complementarios o polos de conmutación.

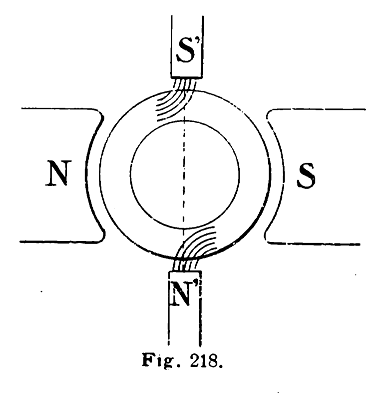


Fig. 218.

Sobre la línea o las líneas neutras se disponen polos sobre los cuales hay arrolladas espiras en serie con el circuito exterior, de tal modo que sean recorridas por la corriente producida por la máquina.

Cuando pasa una parte del inducido por la línea neutra es atravesada por un flujo variable producido por uno de los polos complementarios S' o N' (fig. 218).

El arrollamiento en estos polos es tal, que la fuerza electromotriz creada por esta variación en las espiras en conmutación, que están entonces sobre la línea neutra, produce una corriente local del mismo sentido que i_1, evitando así la formación de chispas (pág. 270).

Si la corriente producida por la máquina aumenta,

el flujo producido por los polos complementarios crece y al mismo tiempo la fuerza electromotriz de inversión; de esta manera las escobillas pueden quedar sobre la línea neutra.

Reacción del inducido.—Sea E la fuerza electromotriz de la máquina y r su resistencia interior; hemos admitido anteriormente que la diferencia de potencial, es decir, el voltaje medido en los bornes cuando la corriente producida es I, tiene por valor:

$$e = E - rI.$$

La experiencia nos dice que, en realidad,

$$e < E - rI;$$

luego hay otra causa de disminucion del voltaje además de la caída óhmica de tensión rI: esta causa es la *reacción del inducido*.

Cuando pasa una corriente por las espiras inducidas se produce un flujo cuyas líneas de fuerza se cierran por las piezas polares, de tal modo que el flujo inductor queda modificado. Para estudiar esta acción magnética de la corriente del inducido dividiremos las espiras que lo componen en dos grupos: 1.°, espiras comprendidas en el doble del ángulo de desvío de las escobillas, es decir, en las regiones MR, $M'R'$ situadas en el interior de los ángulos BX y $B'Y$; 2.°, espiras exteriores a estos ángulos: MR' y RM' (fig. 219).

Produciéndose el cambio de corriente en el inducido al pasar bajo las escobillas, las espiras PR y $P'R'$ comprendidas entre la línea neutra y las escobillas, son recorridas por corrientes dirigidas en sentido inverso de las que tienden a producir las fuerzas electromotrices inducidas en estas espiras. Luego las espiras comprendidas en la región MR son recorridas

por corrientes del mismo sentido, indicado por las flechas, y producen un flujo cuya dirección se puede determinar fácilmente aplicando la regla del sacacorchos, viéndose que es de sentido contrario al flujo inductor producido por los polos *NS*.

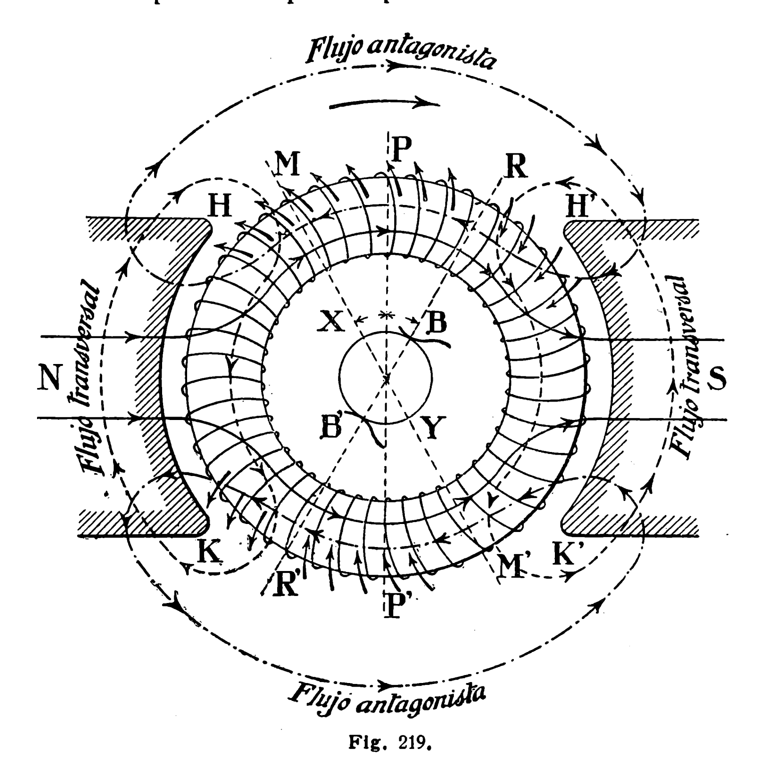
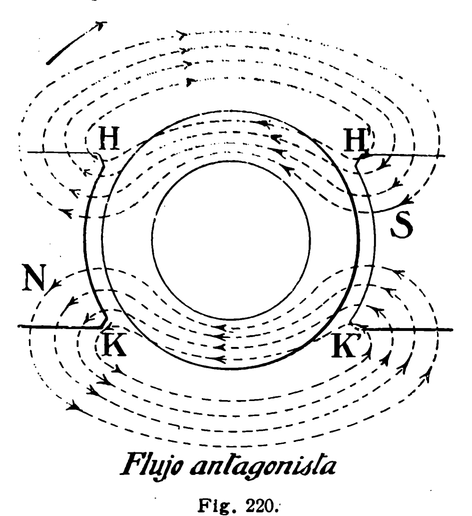


Fig. 219.

Lo mismo sucede con el flujo producido por las espiras *R' M'*.

Por consiguiente, el efecto de la corriente en las espiras comprendidas en el doble del ángulo de desvío de las escobillas es producir un flujo dirigido en sentido inverso del flujo principal. Se designa dicho flujo con el nombre de *flujo antagonista* (fig. 220).

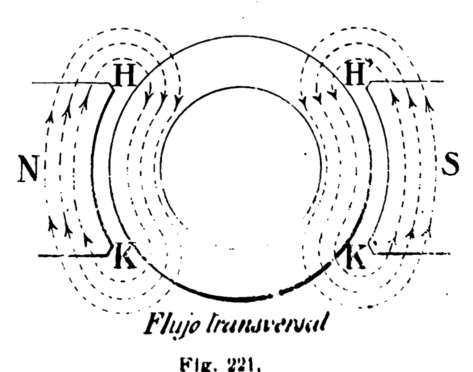
Determinando también el sentido de las líneas de fuerza producidas por las espiras del segundo grupo, se ve que son del mismo sentido que las del flujo principal en los extremos *H* y *K'* de las piezas polares llamadas «lados de salida» y de sentido contrario en los «lados de entrada» *H'* y *K*.



Flujo antagonista

Fig. 220.

El flujo así producido por estas espiras se llama *flujo transversal* (fig. 221); este flujo modifica el flujo principal, acumulando las líneas de fuerza en los lados de salida, produciendo así una especie de torsión que hace girar la línea neutra de un cierto ángulo sobre la línea neutra primitiva.



Flujo transversal

Fig. 221.

El efecto magnético de la corriente inducida es por consiguiente:

1.° Disminuir la fuerza electromotriz por la disminución del flujo útil, producida esta disminución por el flujo antagonista.

2.° Producir una torsión del flujo ocasionada por el flujo transversal (figs. 222 y 223).

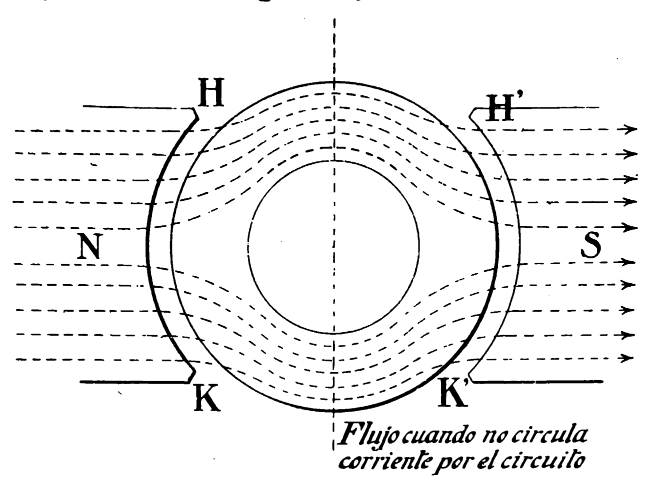


Fig. 222.

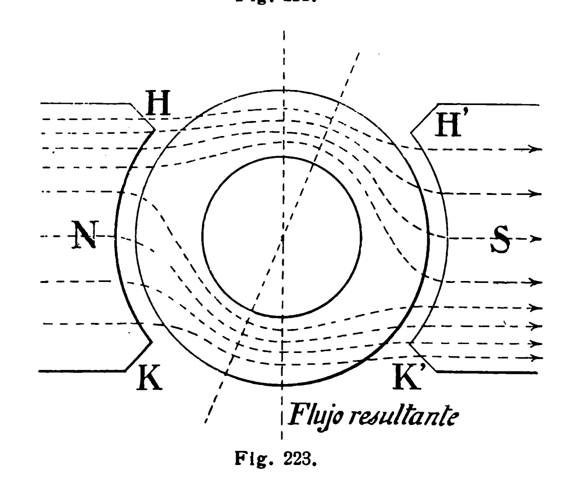


Fig. 223.

Luego el valor de la diferencia de potencial es:

$e = E - rI -$ pérdida de tensión, debida a la reacción del inducido.

Diferentes modos de excitación.—Estudiaremos a continuación los distintos medios de producir la imanación de las piezas polares.

I. Máquinas magneto-eléctricas.—El procedimiento más sencillo consiste en emplear imanes permanentes; estas máquinas tienen muy poca potencia y sólo se emplean para hacer funcionar los timbres (llamadas telefónicas) y en algunas aplicaciones médicas, etc.

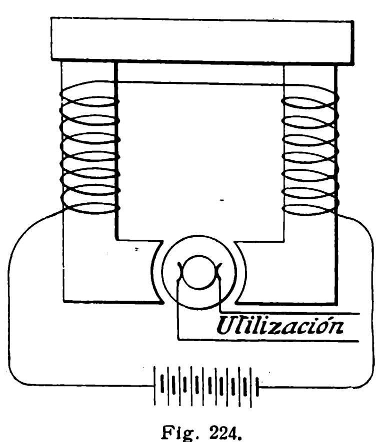


Fig. 224.

II. Excitación separada.—Los núcleos inductores están rodeados por carretes recorridos por una corriente producida por un generador ajeno a la máquina, que puede ser una batería de acumuladores (figura 224), u otra dinamo, que recibe en este caso el nombre de excitatriz.

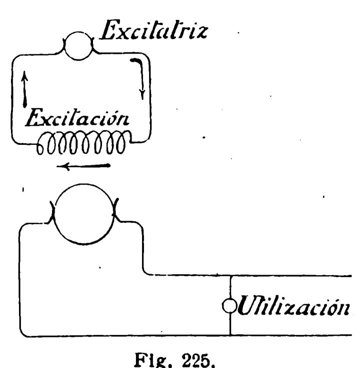


Fig. 225.

Este modo de excitación, muy poco empleado para las máquinas de corriente continua, se utiliza generalmente para las máquinas de corrientes alternas.

La figura 225 representa esquemáticamente una máquina excitada de esta manera.

Variación de la diferencia de potencial en los bornes con el gasto. — Si se mantiene constante la excitación y la velocidad, la fuerza electromotriz, cuyo valor es:

$$E = \frac{N n \Phi}{10^8},$$

permanece invariable, por ser constantes N y Φ.

Cuando la corriente producida por la máquina aumenta, la diferencia de potencial disminuye. En efecto, esta diferencia de potencial está dada por la relación:

$$e = E - rI - \text{reacción del inducido},$$

en que E es constante, luego si la caída óhmica y la caída de tensión debida a la reacción del inducido aumentan, e disminuye.

III. Excitación en serie.—La corriente de excitación es la misma que produce la máquina cuando el circuito inductor está en serie con el inducido y el circuito exterior (fig. 226).

La figura 227 representa una máquina excitada de este modo.

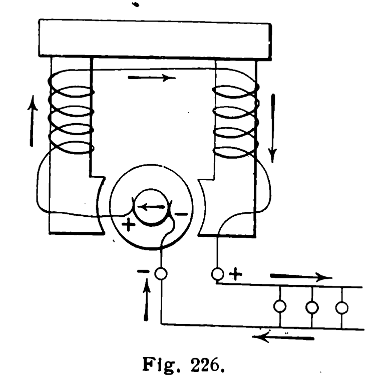


Fig. 226.

Si r es la resistencia del circuito inductor e I la corriente producida, la potencia que absorbe el circuito y que se transforma en calor tiene por valor $r\,I^2$; es necesario, por consiguiente, que r sea pequeña para que la energía perdida bajo la forma de calor sea muy pequeña. Por

esta razón el arrollamiento del inductor está formado por un corto número de espiras de hilo grueso.

Arranque de la dinamo.—Si la máquina gira en circuito abierto, el flujo producido en el núcleo del inducido es debido únicamente al magnetismo remanente que subsiste en las piezas polares, y la fuerza electromotriz es muy pequeña.

Como en este caso la máquina no produce ninguna corriente y por lo tanto no pasa por el circuito inductor, el flujo no puede aumentar y la fuerza electromotriz no crece a pesar de la rotación del inducido.

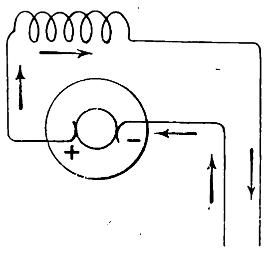


Fig. 227.

Unamos las escobillas a un circuito exterior y hagamos girar la máquina en un sentido tal, que la corriente en los inductores produzca un flujo que sea del mismo sentido que el flujo debido al magnetismo remanente. Si se disminuye poco a poco la resistencia del circuito exterior, se llegará a un valor para el cual se eleva el voltaje bruscamente: se dice que la máquina está *cebada*. El valor de esta resistencia exterior recibe el nombre de *resistencia crítica*.

Por consiguiente, una máquina excitada en serie tiene un sentido de rotación determinado, que es aquel en que la corriente producida aumenta el magnetismo remanente; la máquina no se ceba sino estando cerrada sobre una resistencia inferior a la resistencia crítica. Sin embargo, aunque esté cerrada en corto-circuito, no se ceba si su velocidad no alcanza un cierto valor llamado *velocidad crítica*.

Variación de la diferencia de potencial en los bornes, con la corriente producida.—Hemos visto que la

diferencia de potencial en los bornes de una máquina tiene por valor:

$$e = E - rI - \text{pérdida de tensión, debida a la reacción del inducido.}$$

Supongamos que la corriente, poco intensa al principio, aumenta cada vez más; la corriente en la excitación y por consiguiente el flujo aumentan y la fuerza electromotriz va elevándose. La caída óhmica rI en el inducido y la pérdida de tensión debida a la reacción del inducido aumentan al mismo tiempo.

Ahora bien, por ser la corriente poco intensa, el circuito inductor está poco saturado y, según hemos visto (pág. 175), un pequeño aumento de corriente produce un gran aumento de flujo y, por consiguiente, de E. Este aumento es mayor que el de las caídas de tensión, de modo que la diferencia de potencial aumenta al mismo tiempo que la corriente.

Cuando la corriente alcanza un valor mayor, la inducción en el circuito inductor aumenta: se sabe que para un mismo incremento de la corriente, el del flujo y por consiguiente el de la fuerza electromotriz es menor, habiendo valores de la corriente I para los cuales el aumento de la fuerza electromotriz es igual al de las caídas de tensión; en estas condiciones, e permanece constante para los diferentes valores de I.

Por último, la corriente toma valores bastante grandes para que el circuito inductor se acerque a su saturación, en cuyo caso el flujo y por lo tanto la fuerza electromotriz E no siguen aumentando sensiblemente al aumentar I; a partir de este instante, el aumento de las caídas de tensión es el que prevalece, y la diferencia de potencial disminuye cuando la corriente aumenta.

Estas variaciones de la diferencia de potencial en

los bornes, con la corriente producida por la máquina, se representan según la curva de la figura 228.

Se ve que sobre esta curva hay tres regiones correspondientes a tres valores distintos del régimen: de 0 a I_1 amperes, de I_1 a I_2 y de I_2 a I_3.

Para los valores de I comprendidos en la primera región, la marcha de la máquina es inestable. En efecto, si por una causa cualquiera, una disminución

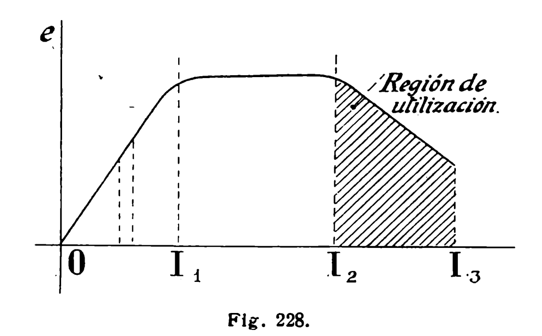


Fig. 228.

de la resistencia exterior, por ejemplo, la corriente aumentara, el voltaje en los bornes de la máquina se elevaría, lo cual haría que la corriente aumentase, de donde se originaría un nuevo incremento de la diferencia de potencial y así sucesivamente. Si, por el contrario, la corriente disminuyera un poco, resultaría una disminución de la diferencia de potencial y por consiguiente una disminución de la corriente y así sucesivamente: la máquina se desceba instantáneamente.

En la segunda región la diferencia de potencial es constante, cualquiera que sea la corriente producida, pero el tiempo en que la máquina goza de esta propiedad es muy corto, no pudiéndose pensar en utilizarla.

Se utiliza siempre la tercera región, que corresponde a una marcha estable, porque si la corriente

aumenta, por ejemplo, la diferencia de potencial disminuye y la intensidad no sigue aumentando; si la corriente disminuye, la diferencia de potencial se eleva y la máquina no se desceba.

Regulación.—Las dinamos excitadas en serie se emplean generalmente en el caso en que se quiera mantener en un circuito de utilización una corriente constante, cualquiera que sea la potencia que se necesite.

La regulación tiene por objeto hacer que aumente la diferencia de potencial en los bornes de la máquina, a medida que aumente la potencia que hay que obtener y de tal modo que la intensidad sea invariable.

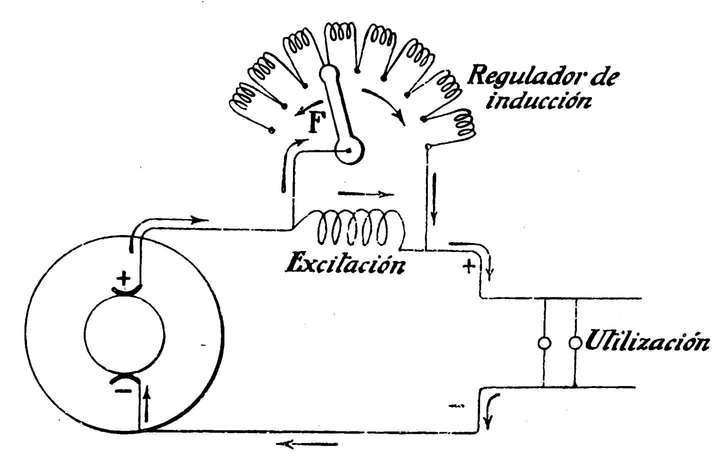
Si el motor que mueve la dinamo es de velocidad constante, se hace la regulación por el flujo inductor o por el desvío de las escobillas o por los dos medios a la vez.

Para actuar sobre el flujo inductor, no se puede poner un reostato en serie con el excitador, porque estaría también en serie con el circuito de utilización y haría aumentar su resistencia. Se pone el reostato llamado *regulador de inducción* (1) en derivación sobre el circuito inductor. Cuando la potencia que se exige a la máquina es pequeña, siendo constante la corriente, la diferencia de potencial es poco elevada. Luego se necesitará un flujo débil, o sea una corriente pequeña en la excitación. Para obtener este resultado es preciso que haya poca resistencia en el regulador de inducción.

A medida que la potencia pedida aumenta, es preciso aumentar la diferencia de potencial, y por consiguiente el flujo, para lo cual se añadirán más resisten-

(1) También se designa este regulador con el nombre de *regulador de excitación,* llamándosele también *reostato de campo.*—N. DEL T.

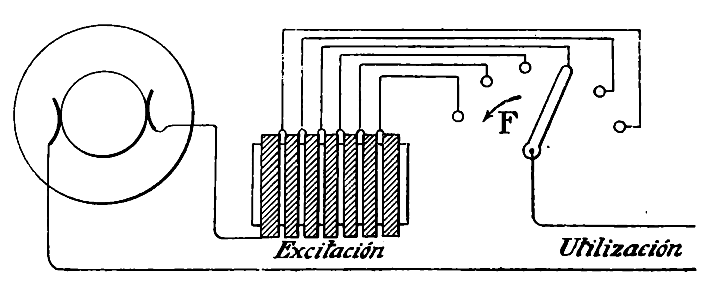
cias al regulador de inducción moviendo la manivela en el sentido de la flecha *F* (fig. 229).



F, sentido del movimiento de la manivela del regulador, cuando aumenta la potencia que se necesita

Fig. 229.

También se puede actuar sobre el flujo, variando el número de espiras inductoras sin hacer variar la



F, sentido del movimiento de la manivela del conmutador, cuando aumenta la potencia exigida

Fig. 230.

corriente de excitación. Para ello se preparan las espiras inductoras en varias partes o secciones, cuyos

extremos se unen a los contactos de un conmutador (figura 230).

Por último, se sabe que aumentando o disminuyendo el desvío de las escobillas, se disminuye o aumenta la fuerza electromotriz de la máquina y por consiguiente la diferencia de potencial entre sus bornes. Luego construyendo una máquina de tal modo que se pueda hacer variar el desvío sin que se produzcan chispas, se podrá por este medio regular el voltaje para producir, con una intensidad constante, una potencia variable.

IV. Excitación shunt o en derivación.—El circuito inductor está en derivación en los bornes de la máquina, shuntando el circuito de utilización: las escobillas están unidas por una parte a los extremos de las espiras inductoras, y por otra parte a los bornes del circuito exterior (fig. 231). La corriente I' producida en el inducido es igual a la suma de las corrientes, i e I, tomadas por la excitación y por la utilización respectivamente:

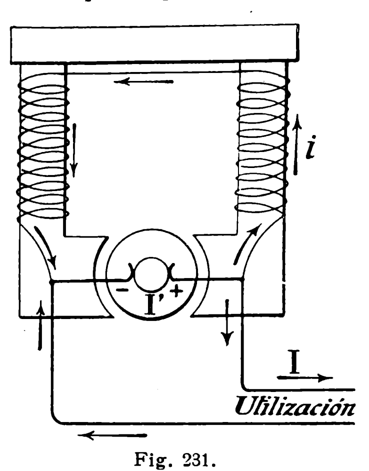


Fig. 231.

$$I' = I + i.$$

La corriente i ha de ser débil, es decir, que el inductor ha de tener mucha resistencia, y como para tener una fuerza magnetomotriz suficiente es preciso compensar el pequeño valor de la corriente con un gran número de vueltas, el devanado inductor se forma con muchas espiras de hilo fino. La figu-

ra 232 representa esquemáticamente una de estas máquinas.

Una máquina excitada de esta manera se ceba en circuito abierto; basta darle una velocidad suficiente, pues obra como una máquina serie, cerrada en corto-circuito. Toda la corriente que produce bajo la influencia del magnetismo remanente pasa por la excitación, luego puede reforzar el flujo primitivo girando en sentido conveniente.

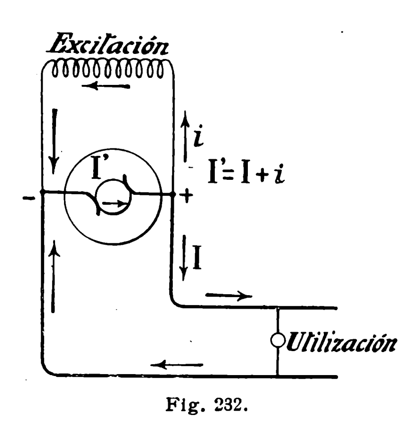


Fig. 232.

En las máquinas muy potentes en que la excitación está formada por un gran número de espiras arrolladas sobre núcleos de hierro de gran sección, la auto-inducción del circuito inductor es considerable. Esta auto-inducción se opone al aumento de la corriente y la máquina se ceba lentamente; por esta razón se procede ordinariamente de modo, cuando es posible, que la excitación se haga directamente, alimentando la máquina al ponerse en marcha por otra dinamo.

Variación de la diferencia de potencial de la corriente producida. — Si la corriente producida aumenta, se produce un aumento de la caída de tensión en el inducido, lo cual hace bajar la diferencia de potencial entre las escobillas. La corriente en la excitación, que se deriva entre estas escobillas, disminuye y al mismo tiempo el flujo, y por consiguiente la fuerza electromotriz de la máquina.

Además, la reacción del inducido aumenta al mismo tiempo que la corriente, resultando por estas tres causas, que la diferencia de potencial en los bornes, que es

$$e = E - rI - \text{pérdida de tensión, debida a la reacción del inducido,}$$

disminuye. La curva que representa estas variaciones tiene la forma indicada en la figura 233.

Fig. 233.

Regulación. — Estas máquinas se utilizan cuando se quiere alimentar un circuito con una diferencia de potencial constante.

Es evidente que si en estas máquinas aumenta o disminuye la potencia que han de producir, la corriente sufrirá las mismas variaciones, por permanecer constante la diferencia de potencial.

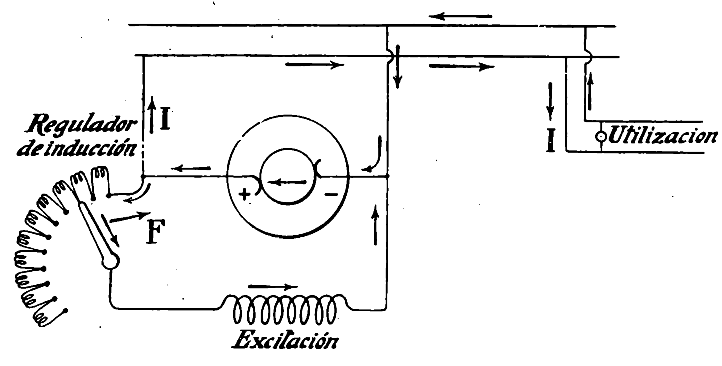


Fig. 234.

Los aparatos de utilización, lámparas o motores, se ponen en derivación con los conductores entre los cuales se quiere mantener la diferencia de potencial

constante. Si el número de aparatos utilizados aumenta, la resistencia total del circuito exterior disminuye y la corriente se eleva; pero hemos visto que al mismo tiempo la diferencia de potencial disminuye; es preciso, pues, que vuelva a alcanzar su valor primitivo.

El procedimiento más sencillo y el más generalizado consiste en poner en serie con el circuito de excitación un *regulador de inducción* (fig. 234).

Cuando la potencia que se exige de la máquina es pequeña, la corriente producida es débil y todas las resistencias del reostato se ponen sobre la excitación. A medida que la corriente aumenta se suprimen resistencias moviendo la manivela en el sentido F, resultando que la corriente de excitación y la f. e. m. se elevan, de modo que se puede mantener invariable la d. d. p. entre las escobillas.

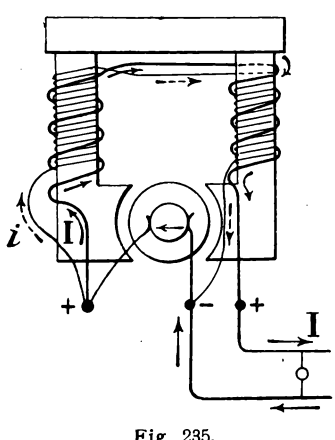


Fig. 235.

V. Excitación compound.—Una máquina con excitación compound tiene dos devanados inductores, uno de hilo grueso en serie con el circuito exterior y otro de hilo fino en derivación entre las escobillas (figs. 235 y 236).

Si la corriente I en el circuito exterior aumenta, se produce un aumento de flujo por la excitación serie, lo cual hace elevar la diferencia de potencial entre las escobillas, mientras que el efecto de la excitación shunt hemos visto que es bajar el voltaje cuando la corriente aumenta. Luego esta doble excitación tiende a mantener constante la diferencia de potencial.

Estas máquinas se emplean cuando las variaciones de intensidad en el circuito exterior son muy bruscas, siendo imposible evitarlas con el regulador de inducción de una máquina shunt; en este caso se encuentran las máquinas que alimentan una red de tracción. También se utilizan en instalaciones particulares de poca importancia, porque si se producen pequeñas variaciones de carga sobre el circuito de utilización, las variaciones de voltaje son despreciables, y no es necesario que haya constantemente una persona encargada de mantener por medio de un reostato el voltaje fijo; para conseguir esto se precisaría una máquina shunt, sobre todo para el alumbrado, porque las variaciones de voltaje, por muy pequeñas que sean, producen variaciones muy grandes en la intensidad luminosa de las lámparas.

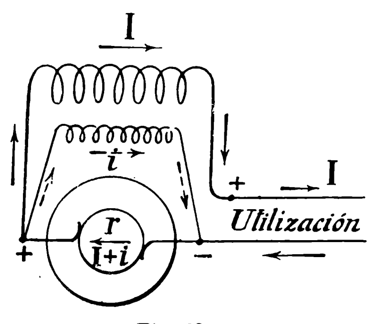


Fig. 236.

Sin embargo, los valores extremos, entre los cuales puede variar la corriente *I* sin modificar el voltaje, están próximos entre sí, de modo que no se puede en general suprimir completamente la regulación; esta regulación se obtiene con un regulador de inducción en serie con la excitación shunt (fig. 237).

Estas máquinas no se deben utilizar en paralelo con una batería de acumuladores. En efecto, sea la utilización de esta clase representada esquemáticamente en la figura 238.

Supongamos que por una razón cualquiera, por ejemplo la disminución de velocidad del motor que

acciona la dinamo compound, la fuerza electromotriz de esta máquina disminuye hasta hacerse inferior a la de la batería. Una corriente circulará en la máquina, viéndose que la corriente se encuentra invertida en la excitación serie, mientras que conserva su sentido primitivo en la excitación shunt. Puede suceder que el flujo debido a la excitación serie sea mayor que el producido por la excitación shunt, encontrándose los polos magnéticos de la máquina invertidos, y como ésta sigue girando en el

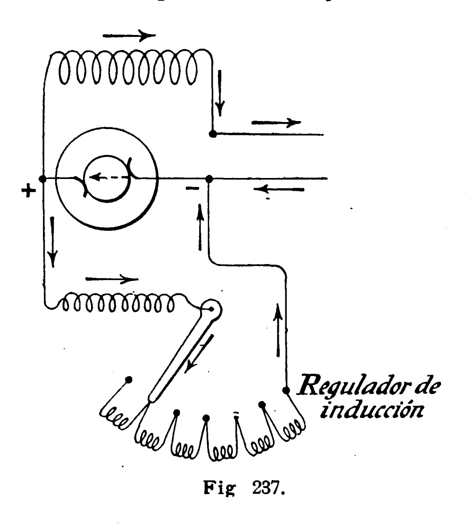


Fig 237.

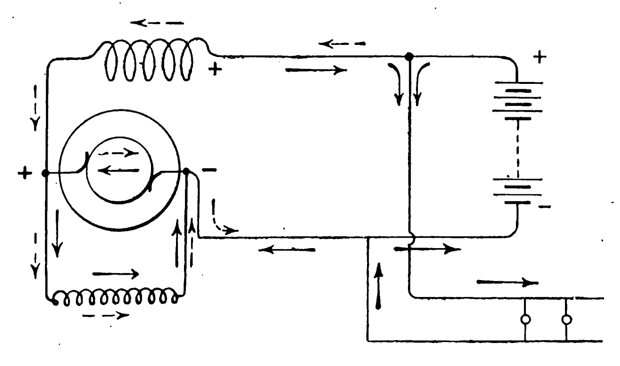


Fig. 238.

mismo sentido, los polos eléctricos también se invertirán. La dinamo y la batería están montadas en serie

y cerradas en corto-circuito, resultando una corriente considerable nociva para la máquina y la batería.

En la figura 238 se indica con flechas de trazo continuo la corriente normal y con flechas de trazos la corriente cuando la f. e. m. de la dinamo es inferior a la de la batería.

Acoplamiento de dinamos.—Para que una dinamo funcione en buenas condiciones, en cuanto a su rendimiento, es preciso que trabaje casi en plena carga.

Es muy frecuente, sobre todo en las centrales para los servicios públicos, que la potencia utilizada varíe considerablemente según las horas del día. Si sólo se tiene una máquina, tendrá ésta que producir la potencia máxima y funcionará raras veces con carga suficiente, es decir, en buenas condiciones.

Lo que se hace es repartir esta potencia total máxima entre un cierto número de unidades, estando formada cada unidad por un motor y una dinamo. Cuando una unidad llega a su carga máxima se le añade otra; de aquí la necesidad de acoplar entre sí las diferentes unidades de la fábrica.

Este acoplamiento se hace del mismo modo que el de las pilas, es decir, en serie o en paralelo.

En la práctica se presentan los casos siguientes:

1.° Acoplamiento en serie de máquinas serie;

2.° Acoplamiento en paralelo de máquinas shunt;

3.° Acoplamiento en paralelo de máquinas compound.

I. Acoplamiento en serie de máquinas serie.—Ya hemos dicho que estas máquinas se utilizan para distribuciones a intensidad constante; en estas distribuciones todos los aparatos de utilización están en serie y en serie con las máquinas generatrices (fig. 239).

Para suprimir un aparato en servicio sobre la red,

se le pone en corto-circuito, con lo cual se disminuye la resistencia del circuito exterior, tendiendo a aumentar la intensidad de la corriente; se la mantiene constante haciendo disminuir la diferencia de potencial en los bornes por el medio que hemos indicado.

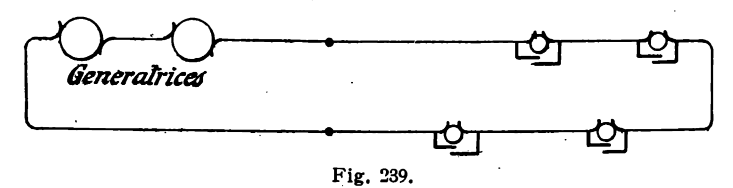


Fig. 239.

Supongamos que la potencia utilizada sea muy pequeña, es decir, que haya pocos aparatos en servi-

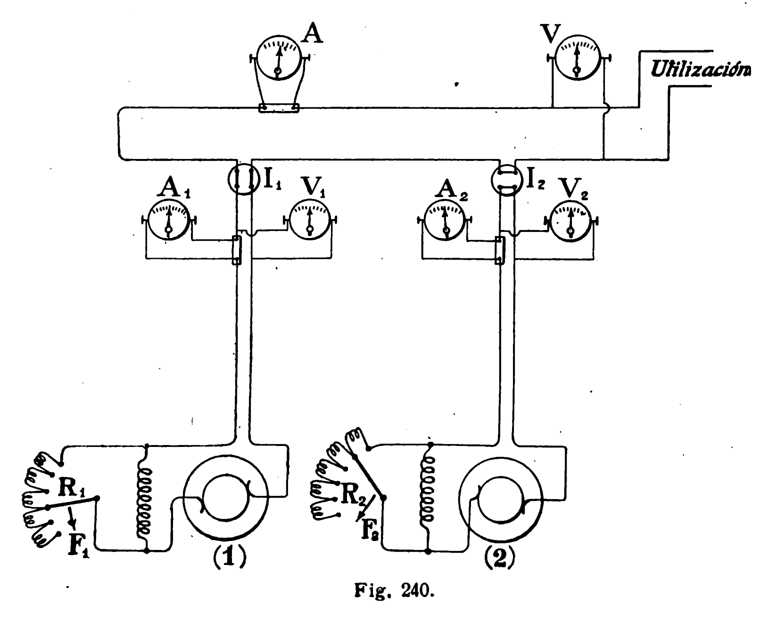


Fig. 240.

cio sobre la línea; en este caso basta con una sola máquina (1) (fig. 240). A medida que aumenta la potencia, por entrar en el circuito otros receptores, la resis-

tencia del circuito aumenta y la intensidad indicada por el amperímetro A tiende a disminuir; siendo necesario, para que alcance su valor normal, mover la manivela del regulador de inducción R_1 en el sentido F_1 elevándose así el voltaje indicado por el voltímetro V_1. El interruptor I_2 de la segunda máquina (2), pone a ésta en corto-circuito y la indicación del voltímetro V_1 de la máquina (1) es la misma que la del voltímetro general V.

Cuando la manivela del reostato R_1 está al final de su carrera, se pone en marcha la máquina (2) y se cierra el interruptor I_2 que la pone en serie sobre el circuito. El amperímetro A_2 indicará la misma intensidad que A_1 y que el amperímetro general A. El voltaje indicado por V_2 será al principio poco elevado; a medida que aumente la potencia se correrá la manivela del reostato R_2 en el sentido F_2 para mantener la corriente constante. En cada instante la indicación de V es igual a la suma de las indicaciones de V_1 y de V_2.

II. Acoplamiento en paralelo de máquinas shunt.— Estas máquinas se utilizan para distribuciones a dife-

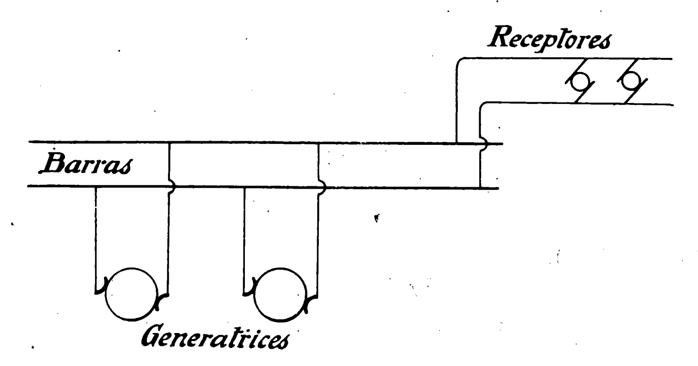


Fig. 241.

rencia de potencial constante; los aparatos de utilización están montados en paralelo entre dos cables uni-

dos a dos barras que reciben directamente la corriente de las máquinas generatrices (fig. 241).

Cuando la potencia que se necesita aumenta, es decir, cuando se ponen en servicio más aparatos receptores, la resistencia del circuito disminuye, la corriente aumenta y la diferencia de potencial tiende a disminuir; para mantenerla constante se hace uso del regulador de inducción, como ya hemos indicado.

Si funciona una sola máquina (1) se mueve la manivela de su regulador de inducción en el sentido F_1 (figura 242).

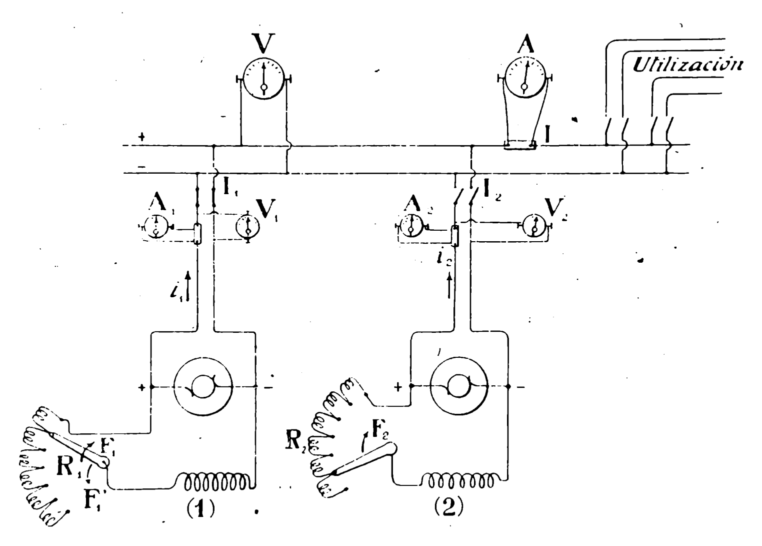


Fig. 242.

Cuando esta manivela ha recorrido todo el regulador, si la potencia exigida por los receptores continúa aumentando, es preciso acoplar otra máquina en paralelo con la primera.

Para esto se hace girar la máquina (2) con su velocidad normal y se actúa sobre su regulador de induc-

ción R_2 de modo que el voltímetro V_2 indique un voltaje algo superior al que indica el voltímetro general V, es decir, al voltaje que se quiere mantener constante. Entonces se cierra el interruptor I_2; la máquina (2) funciona en paralelo con la (1), de manera que la corriente I en el circuito de utilización dada por el amperímetro A es igual a la suma de las corrientes i e i_2 producidas por cada máquina y dadas por los amperímetros A_1 y A_2.

Al poner en servicio la máquina (2), la corriente que suministra a la red exterior es débil, de modo que la potencia se debe casi enteramente a la máquina (1). Se puede repartir la carga entre las dos máquinas haciendo avanzar la manivela del reostato R_2 en el sentido F_2 y moviendo en sentido contrario F'_1 la del reostato R_1; la corriente producida por la máquina (2) aumenta, mientras que la producida por la máquina (1) disminuye, de manera que se puede obtener para las dos dinamos sensiblemente el mismo gasto, y por consiguiente la misma carga.

Hemos visto que si las máquinas son de gran potencia exigen para cebarse bastante tiempo a causa de la gran auto-inducción de sus inductores.

Para evitar este inconveniente se une directamente el circuito de los inductores con las barras, obteniéndose así inmediatamente la corriente normal de excitación, y por consiguiente, el voltaje bajo el cual funciona la instalación desde que la máquina adquiere su velocidad normal.

Para retirar la máquina basta abrir el interruptor a del inducido y parar el motor; a continuación se corta la corriente sobre la excitación abriendo el interruptor b. No debe cortarse esta corriente bruscamente porque se produciría en los devanados del inductor una fuerza electromotriz de auto-inducción muy ele-

vada que podría agujerear el aislador. Por otra parte, si se corta la corriente lentamente por medio de un interruptor sin un dispositivo especial para ruptura brusca, se produce una chispa muy larga que puede resultar peligrosa.

Para evitar accidentes se procede de la siguiente manera (fig. 243):

Se pone en marcha la máquina como ya hemos dicho, es decir, se cierra el interruptor *b*, se hace girar la máquina con su velocidad de régimen, se regula su voltaje por medio del regulador de induc-

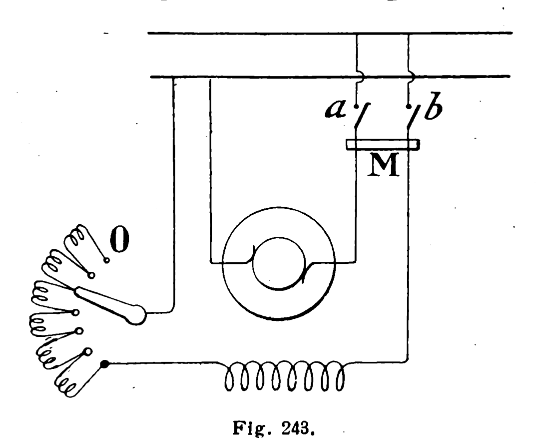


Fig. 243.

ción y, una vez alcanzado el valor conveniente, se cierra el interruptor *a*. Entonces, los dos conductores del inductor y del inducido están unidos entre sí por una barra de cobre *M*, que evidentemente no tiene efecto alguno durante la marcha.

Para parar la máquina se abre el interruptor *a*, después el interruptor *b*, lo cual se hace sin ningún inconveniente, porque el devanado inductor sigue cerrado por el inducido y la barra *M*; se lleva la manivela del reostato al punto muerto *O*, se deja que vaya

perdiendo velocidad la máquina y se quita la barra *M*.

III. Acoplamiento en paralelo de máquinas compound. — Este acoplamiento está representado esquemáticamente en la figura 244: los devanados serie están unidos entre sí y las conexiones se hacen como para las máquinas shunt. Es necesario además unir entre sí los extremos de los devanados serie unidos a las escobillas. En efecto, supongamos que una de las máquinas, la (1) por ejemplo, adquiera una fuerza elec-

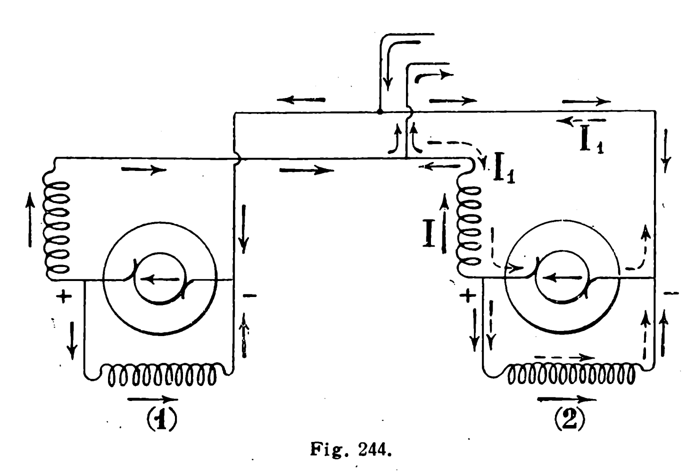


Fig. 244.

tromotriz superior a la de la otra, y que no se haya hecho esta unión; la corriente producida por la máquina (1) pasaría por la máquina (2), y se ve, examinando el esquema, que el devanado serie de esta dinamo (2) sería recorrido por una corriente I_1, de sentido contrario al de la corriente I que lo recorre ordinariamente. De aquí resultaría una disminución de su fuerza electromotriz, y la corriente inversa de la corriente normal iría aumentando, pudiendo suceder que la imanación debida a la excitación serie se invirtiera, lo cual ocurriría si la corriente I_1 se hiciera mayor que I,

siendo superior entonces esta imanación a la que produciría la excitación shunt. Los polos magnéticos, y por consiguiente los polos eléctricos de la máquina (2)

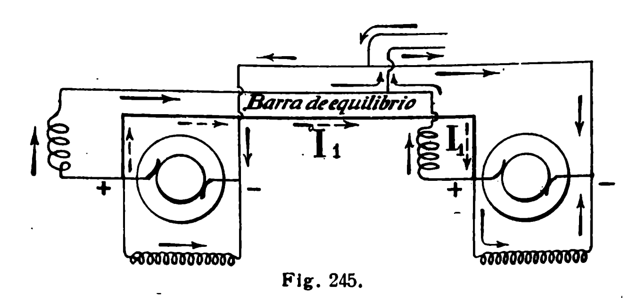


Fig. 245.

se invertirían, de modo que las dos máquinas estarían montadas en serie y cerradas en corto-circuito, siendo

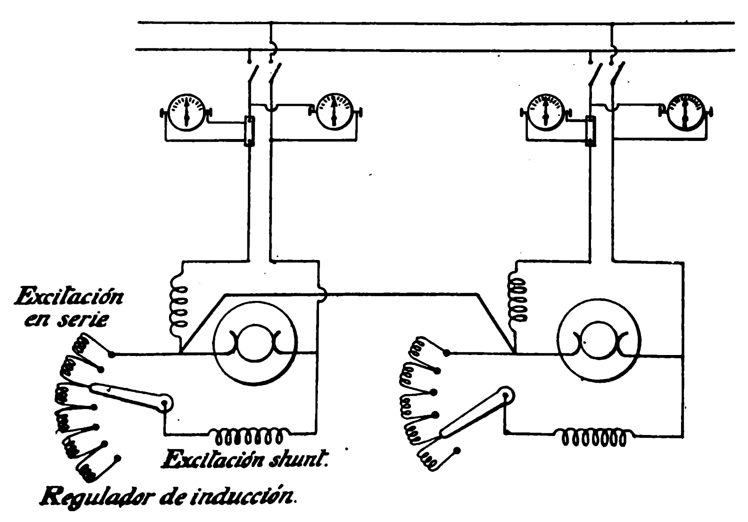


Fig. 246.

recorridas por una corriente de intensidad peligrosa.

En cambio, si están en comunicación los polos de la máquina que están unidos a los devanados serie, no

puede producirse la inversión, porque la corriente I_1 pasará por la barra conductora y no atravesará el devanado serie de la máquina (2). Esta barra, llamada *barra de equilibrio* o *de compensación*, debe ser de gran sección, porque ha de ser menos resistente que los devanados serie de las máquinas, devanados que son a su vez poco resistentes (figs. 245 y 246).

Es prudente también no colocar ningún interruptor sobre esta barra y, en caso de hacerlo, deben ser de grandes dimensiones y estar muy bien conservados.

CAPÍTULO XIII

Electromotores

Las máquinas dinamo-eléctricas son reversibles, es decir, que adquieren un movimiento de rotación y pueden utilizarse como motores, cuando son recorridas por una corriente suministrada por un generador cualquiera.

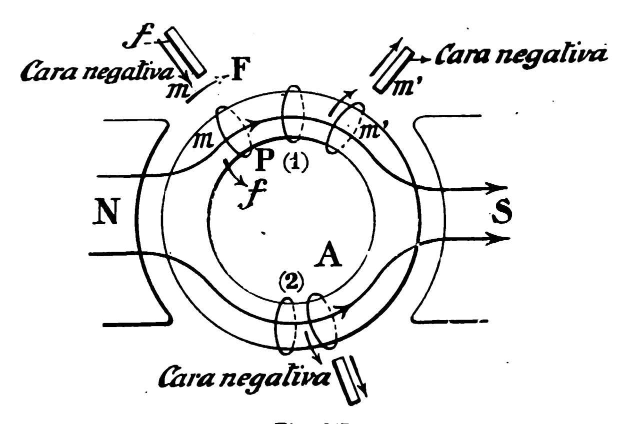


Fig. 247.

En efecto; consideremos, como hicimos al estudiar las dinamos, una espira que pueda moverse alrededor de la armadura *A* atravesada por el flujo *NS* (fig. 247). Hemos visto (pág. 233) que cuando esta espira es recorrida por una corriente, está sometida a una fuerza que tiende a orientarla de modo que el flujo entre por su

cara negativa, y se mueve hasta que el flujo alcanza su valor máximo; entonces está la espira en una posición de equilibrio. La cara negativa de la espira es la que está a la derecha de un observador tendido a lo largo de la espira y mirando hacia dentro, de modo que la corriente le entre por los pies y le salga por la cabeza.

Sea *P* una posición de la espira recorrida por una corriente de sentido *f*; la cara negativa de esta espira es la *m*, luego el flujo entra por su cara negativa.

La espira se moverá de modo que el flujo alcance un máximo, es decir, se moverá en el sentido *F* hasta la posición (1).

En virtud de la velocidad adquirida, pasará de la posición (1), pero volverá otra vez a la misma posición después de algunas oscilaciones, si la corriente conserva el mismo sentido. Pero supongamos que al pasar por (1) la corriente se invierte; en este caso la cara negativa de la espira estará en *m'*, el flujo entrará por su cara positiva y se moverá de modo que éste entre por su cara negativa, y como ha pasado de su posición de equilibrio continuará moviéndose hasta (2).

Si al pasar por (2) se invierte otra vez la corriente, la espira seguirá moviéndose en el mismo sentido hasta (1). Por consiguiente, si cada vez que la espira pasa por las posiciones (1) y (2), que determinan la línea neutra, se invierte el sentido de la corriente, la espira girará de un modo continuo.

Supongamos ahora que la armadura está completamente envuelta por espiras (fig. 248); se comprende fácilmente que a un lado y a otro de la línea neutra *LL'*, las espiras del inducido están recorridas por corrientes de sentido inverso, y, según lo que acabamos de

decir, girarán todas en el mismo sentido. Si las espiras están unidas a la armadura, la arrastrarán en su

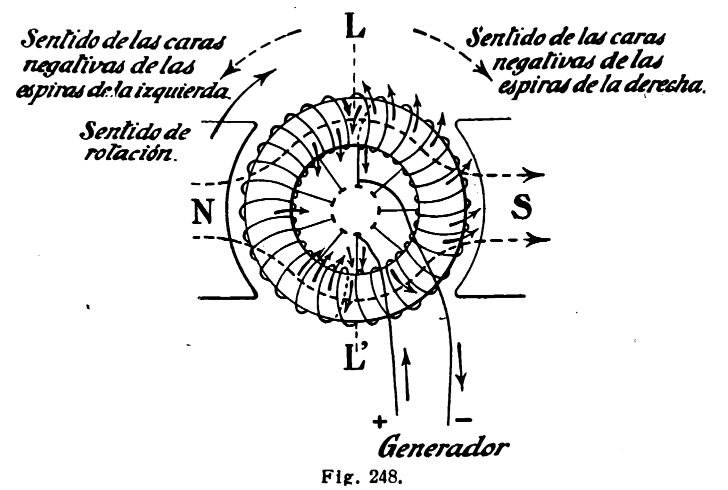


Fig. 248.

movimiento, así como el árbol en que está montada; es decir, que la máquina obrará como un motor.

Sentido de rotación. — Las cuestiones relativas al sentido de rotación de un motor, se resuelven partiendo de los principios siguientes:

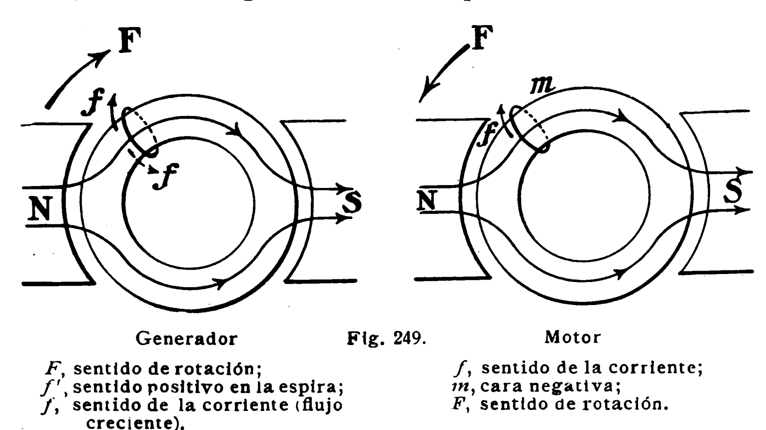
1.° *Cuando un motor tiene la misma dirección de flujo que un generador, gira en sentido inverso del movimiento de rotación que habría que dar al generador para que se produjera en sus espiras inducidas una corriente del mismo sentido que la que recorre el inducido del motor.*

Se comprueba este principio aplicando las reglas que hemos dado para determinar el sentido de la corriente inducida en un generador, y recíprocamente, para determinar el sentido de rotación de un motor (figura 249).

2.° *Si se invierte el sentido de la corriente en el*

inducido o en el inductor, el sentido de rotación se invierte también.

En efecto, si se cambia el sentido de la corriente en el inducido, la cara negativa de las espiras cambia, y como el sentido del flujo es el mismo, la espira es solicitada en sentido inverso. Si cambia el sentido del flujo, la cara negativa de cada espira no cambia, pero



Generador — Fig. 249. — Motor

F, sentido de rotación;
f', sentido positivo en la espira;
f, sentido de la corriente (flujo creciente).

f, sentido de la corriente;
m, cara negativa;
F, sentido de rotación.

para que el nuevo flujo entre por esta misma cara, es preciso que la espira gire en sentido inverso de como giraba antes.

3.° *Si se invierten simultáneamente el sentido de la corriente en el inductor y en el inducido, el sentido de rotación no cambia.*

Estas dos inversiones producen dos cambios de sentido de rotación, lo cual equivale evidentemente a conservar el sentido primitivo.

Motor excitado en serie.— De estos principios se deduce que un motor serie sólo puede tener un sentido de rotación, una vez establecidas las conexiones, que es el sentido inverso del que hay que darle para utilizarlo como generador. En efecto, si la corriente que lo ali-

menta tiene el mismo sentido en el inducido que la que da el generador, la corriente en los inductores es también del mismo sentido en los dos casos (fig. 250). Si

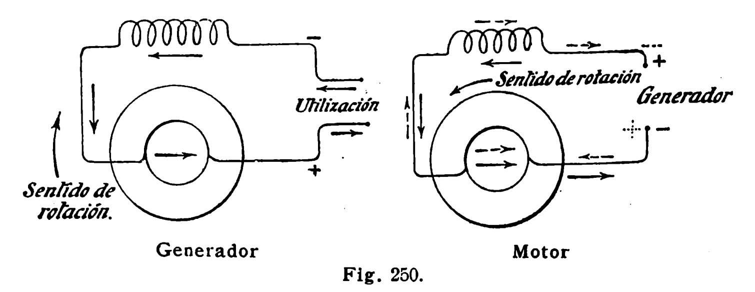


Fig. 250.

se invierte el sentido de la corriente en el motor, la corriente se invertirá a la vez en el inductor y en el inducido y la máquina seguirá girando en el mismo

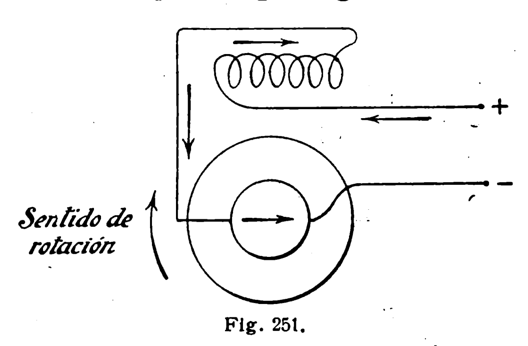
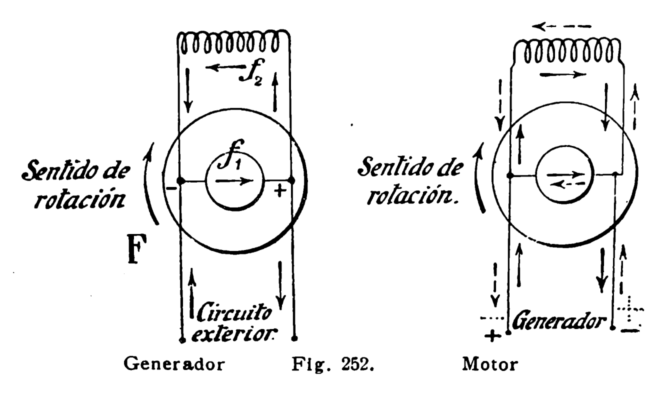


Fig. 251.

sentido. Si se quiere cambiar este sentido, habrá que modificar las conexiones entre el devanado inductor y el inducido (fig. 251).

Motor excitado en derivación.—Sea F el sentido de rotación de un generador shunt que da en su inducido una corriente de sentido f_1; la corriente en el inductor tendrá el sentido f_2. Utilicémoslo como motor de modo que sea recorrido por una corriente del mismo sentido en el inducido; en el inductor se

producirá una corriente de sentido contrario (fig. 252). Ahora bien, se sabe que si las corrientes tuvieran el mismo sentido en el inducido y en el inductor, la máquina giraría como motor, en sentido inverso de su



Generador Fig. 252. Motor

rotación como generador; pero como la corriente es del mismo sentido en el inducido y de sentido contrario en el inductor, girará en el mismo sentido que como generador.

Si se cambia el sentido de la corriente en la máquina, se invierten a la vez las corrientes en el inductor y en el inducido, y el sentido de rotación no cambia.

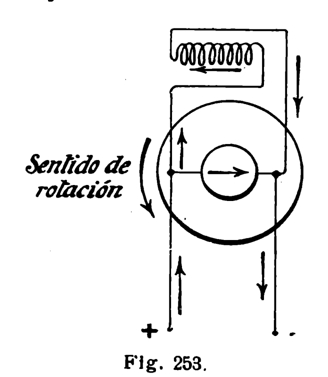
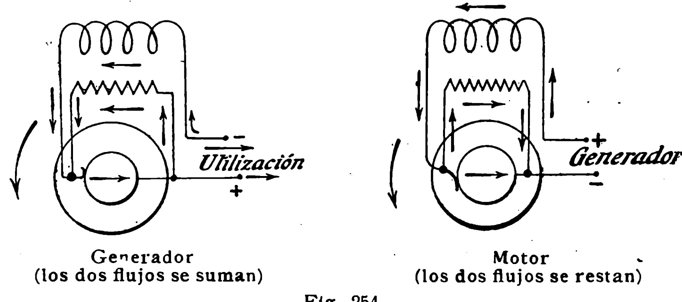


Fig. 253.

Por consiguiente: una máquina shunt no tiene más que un sentido de rotación posible, que es el mismo de la máquina utilizada como generador.

Si se quiere cambiar este sentido de rotación, será preciso invertir las conexiones entre el inducido y el inductor (fig. 253).

Motor con excitación compound.—Cuando una máquina compound funciona como generador, la corriente es tal, que los flujos producidos por la excitación serie y por la excitación shunt se suman. Supongamos que se utiliza la máquina como motor; en este caso, si la corriente es del mismo sentido que para el generador en la excitación serie y en el inducido, es de sentido contrario en la excitación shunt; los dos flujos son de sentido contrario y se restan (fig. 254).



Generador
(los dos flujos se suman)

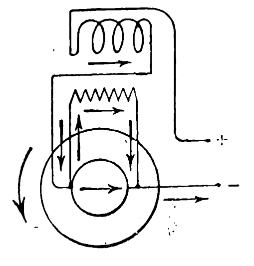
Motor
(los dos flujos se restan)

Fig. 254.

Como el flujo producido por la excitación shunt predomina en general sobre el de la excitación serie, la máquina obra desde el punto de vista de la rotación como una máquina shunt y gira como motor en el mismo sentido que como generador. Por lo tanto, es peligroso utilizar la máquina como motor.

En efecto, supongamos que por una razón cualquiera, por ejemplo, el aumento del par resistente opuesto al motor, la corriente absorbida por la máquina aumente; el devanado serie será recorrido por una corriente creciente y elevada, la caída de tensión rI en el inducido aumentará y por lo tanto la diferencia de potencial entre las escobillas disminuirá, así como también la corriente en la excitación shunt. Luego el flujo producido por la excitación shunt dis-

minuye, y el producido por la excitación serie aumenta, y puede suceder que este último predomine; el flujo se encuentra entonces invertido y, como la corriente en el inducido conserva su sentido, la máquina girará en sentido contrario, lo cual puede ocasionar graves accidentes.



Motor
(los dos flujos son del mismo sentido)
Fig. 255.

Por lo tanto, será prudente modificar las conexiones entre el devanado serie y los bornes de la máquina, de tal modo que los dos flujos se sumen. El sentido de rotación no cambiará, porque el flujo total conservará el sentido del flujo debido a la acción preponderante de la excitación shunt en el montaje precedente (fig. 255).

Fuerza contra-electromotriz desarrollada por un motor.—Según hemos dicho (pág. 97), el inducido gira como motor en las mismas condiciones que como generador, y desarrolla por consiguiente, a igualdad de velocidad y de flujo, la misma fuerza electromotriz entre las escobillas. Esta fuerza electromotriz, llamada fuerza contra-electromotriz desarrollada por el motor, tiene, pues, por valor:

$$E = \frac{N n \Phi}{10^8} \text{ volts.}$$

Intensidad de la corriente gastada por un motor.—Sea u la diferencia de potencial aplicada a los bornes del motor; según hemos visto (pág. 98), esta diferencia de potencial está equilibrada por la fuerza contra-electromotriz desarrollada y por la caída de tensión rI en el interior, siendo I la corriente gastada por la

máquina y r su resistencia interior. Se tiene, pues:

$$u = E + rI,$$

de donde:

$$I = \frac{u - E}{r}.$$

Al arrancar el motor, es decir, en el momento en que se aplica la diferencia de potencial u entre sus bornes, no se desarrolla ninguna fuerza contra-electromotriz, por estar el motor en reposo, es decir, que $E = 0$, luego:

$$I = \frac{u}{r}.$$

Ahora bien, r es de pequeño valor, y tanto más pequeño cuanto más potente es el motor, porque las espiras inducidas son de sección tanto más grande cuanto más intensa es la corriente que ha de recorrerlas. La corriente $I = \frac{u}{r}$ al arrancar tendría un valor excesivo que quemaría la máquina o fundiría los fusibles de protección de la instalación. Es necesario, por consiguiente, proteger el inducido contra esta corriente excesiva, para lo cual se le pone en serie un reostato llamado *reostato de arranque*, en el que se van suprimiendo resistencias a medida que el motor adquiere velocidad y desarrolla una fuerza contra-electromotriz suficiente.

Cuando el motor está en marcha, si el par resistente que le opone la máquina que él acciona aumenta, la corriente aumenta al mismo tiempo. En efecto, la potencia gastada por el motor es uI, cuya potencia debe aumentar al mismo tiempo que la que necesita la máquina accionada por él y por consiguiente al mismo tiempo que el par resistente; luego la corriente I ha de

aumentar al mismo tiempo que el par, si u se mantiene constante.

Velocidad de un motor.—En la fórmula

$$u = E + rI,$$

sustituyamos E por su valor $\frac{Nn\Phi}{10^8}$ y tendremos:

$$u = \frac{Nn\Phi}{10^8} + rI,$$

de donde:

$$\frac{Nn\Phi}{10^8} = u - rI,$$

$$N = \frac{(u - rI)\,10^8}{n\,\Phi} \text{ vueltas por segundo.}$$

Esta fórmula nos dice que la velocidad de un motor es tanto mayor cuanto menor es el flujo Φ.

Por consiguiente, se hará variar la velocidad actuando sobre el flujo, y en general haciendo variar la corriente en la excitación por medio del reostato llamado *regulador de inducción*. También se logra el mismo resultado actuando sobre la reluctancia del circuito magnético por medio de piezas polares móviles, lo cual permite aumentar o disminuir el entrehierro; a un aumento corresponde un flujo menor y por consiguiente una aceleración; a una disminución del entrehierro corresponde una disminución de velocidad.

Se ve la relación entre la velocidad del motor y la variación del flujo, del modo siguiente:

Siendo pequeña la resistencia interior, rI resulta despreciable en comparación a E, y puede decirse que la fuerza contra-electromotriz que tiene que desarrollar un motor es sensiblemente igual a la diferencia de potencial que se le aplica; luego el motor adquiere una

velocidad que cumple con esta condición. Si el flujo disminuye, es preciso que la velocidad aumente para que la fuerza contra-electromotriz desarrollada sea suficiente; si el flujo aumenta, la velocidad disminuye, porque si no disminuyera, la fuerza contra-electromotriz llegaría a ser mayor que la diferencia de potencial aplicada, y el motor daría energía al generador de corriente en lugar de recibirla; lo cual es evidentemente imposible.

Par motor.—Sea C el valor del par desarrollado en la polea de un motor; cuando este motor gire de un ángulo a, el trabajo producido tendrá por valor $C \times a$.

Cuando da una vuelta completa, el ángulo que ha girado vale 2π y el trabajo producido es $C \times 2\pi$. Sea N el número de vueltas por segundo; la duración de una vuelta es $\frac{1}{N}$ de segundo, que es el tiempo que el motor necesita para efectuar el trabajo $C \times 2\pi$. Su potencia es, por consiguiente:

$$\frac{C \times 2\pi}{\frac{1}{N}}, \qquad \text{o sea} \qquad 2\pi NC.$$

Además, si E es la fuerza contra-electromotriz que desarrolla el motor e I la corriente absorbida, su potencia tiene por valor $E\,I$; luego se tiene:

$$2\pi NC = EI,$$

y sustituyendo E por $\frac{Nn\Phi}{10^8}$, se tendrá:

$$2\pi NC = \frac{Nn\Phi}{10^8} I,$$

de donde:

$$C = \frac{n\,\Phi\,I}{2\pi \times 10^8} \text{ joules.}$$

Es decir, que el par motor de un motor es independiente de su velocidad y es proporcional al producto $\Phi\ I$ del flujo útil emitido por polo, por la corriente absorbida. Luego se podrá escribir:

$$C = K\ \Phi\ I.$$

Desvío de las escobillas.— Un razonamiento análogo al que nos condujo a desviar las escobillas de un generador en el sentido de la rotación del inducido, es decir, hacia adelante, con relación a la línea neutra, nos indicaría que en el caso de un motor habría que desviarlas hacia atrás, respecto a esta línea neutra. Por consiguiente, si la máquina es de excitación serie, no habrá necesidad de mover las escobillas cuando se utilice como motor (fig. 256). Al contrario, para una máquina shunt o compound será preciso, cuando se trate de utilizarla como motor, colocar las escobillas en una posición simétrica, con relación a la línea neutra, de la que ocupaban cuando la máquina trabajaba como generador (fig. 257).

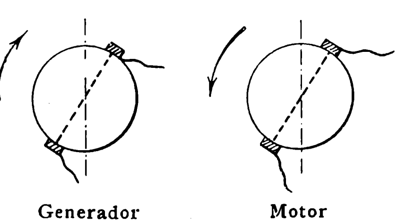


Fig. 256.

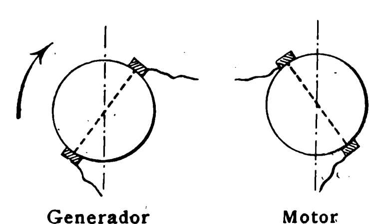


Fig. 257.

Instalación de motores.—De todo lo dicho referente a motores, se deduce que en la instalación de un motor habrá que disponer de un reostato de arranque

para proteger el inducido contra una corriente excesiva al arrancar, y de un regulador de inducción destinado a variar la velocidad.

I. **Motor serie.** — El regulador de inducción está en derivación sobre el devanado serie (figs. 258 y 259).

Al arrancar, la manivela del regulador de inducción *Ri* está sobre el punto muerto *e*, y la corriente pasa íntegra por el devanado inductor; la manivela

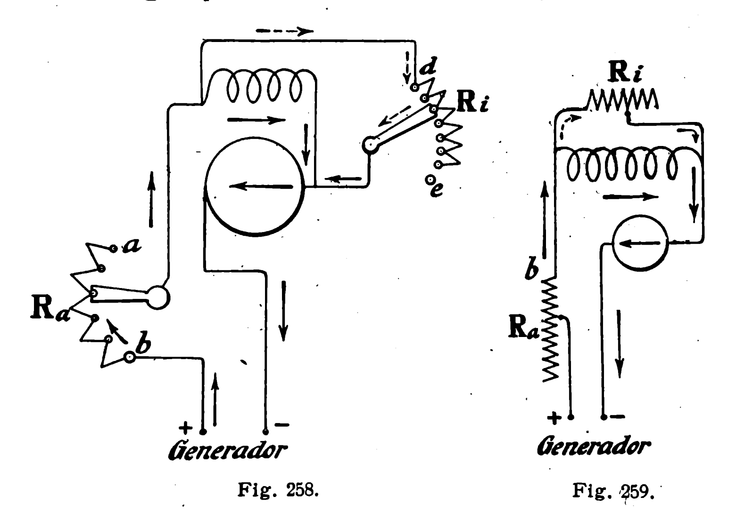


Fig. 258.

Fig. 259.

del reostato de arranque *Ra* está al principio sobre el punto *a*, estando todas las resistencias de este reostato sobre la máquina; se avanza poco a poco esta manivela hacia *b* hasta suprimir todas las resistencias. El motor tiene entonces su velocidad mínima; si se quiere aumentar, se mueve la manivela de *Ri* hacia *d*, con la cual se disminuirán cada vez más las resistencias en derivación sobre la excitación. La corriente disminuye poco a poco en el devanado inductor y la velocidad aumenta.

Ordinariamente se reúnen en un solo aparato el

reostato de arranque y el regulador de inducción, como indica el esquema de la figura 260.

Las resistencias (1) constituyen el reostato de arranque y las resistencias (2) el regulador de inducción.

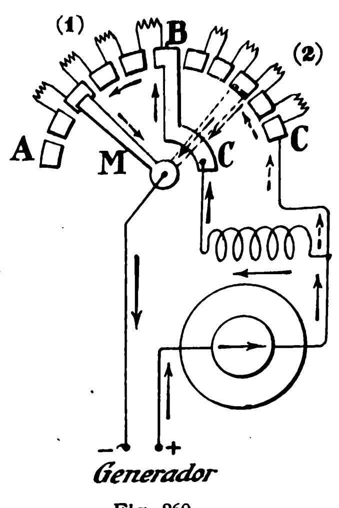


Fig. 260.

Se ve que cuando la manivela *M* está entre *A* y *B*, la corriente pasa íntegra por el inductor, y no pasa corriente alguna por el regulador de inducción (2).

Se pondrá en marcha el motor, moviendo la manivela de *A* hacia *B*. Si se sigue moviendo en el mismo sentido, la corriente pasará por la prolongación *C* del contacto *B* y una parte se derivará por las resistencias (2); la velocidad aumentará a medida que la manivela se acerque a *C*.

II. Motor shunt. — Las condiciones que se han de cumplir son las siguientes:

1.ª Excitar el motor haciendo pasar por los inductores la corriente máxima.

2.ª Hacer pasar a continuación la corriente por el inducido, protegiéndolo contra una corriente demasiado intensa por medio del reostato de arranque.

3.ª Una vez en marcha el motor, poder variar la velocidad, por medio de un regulador de inducción en serie con el devanado inductor.

Estas condiciones quedan satisfechas en el montaje representado por la figura 261.

En el momento del arranque, la manivela del regu-

lador de inducción *Ri* está sobre *d* y las resistencias de este reostato no están en el circuito de los inductores. Cuando la manivela del reostato de arranque *Ra* pasa del punto muerto *B* al primer contacto *C*, la corriente pasa directamente al inductor y las resistencias de este reostato están en serie con el inducido. Se mueve la manivela hasta *A* de modo que se supriman todas estas resistencias y entonces se tiene la velocidad mínima.

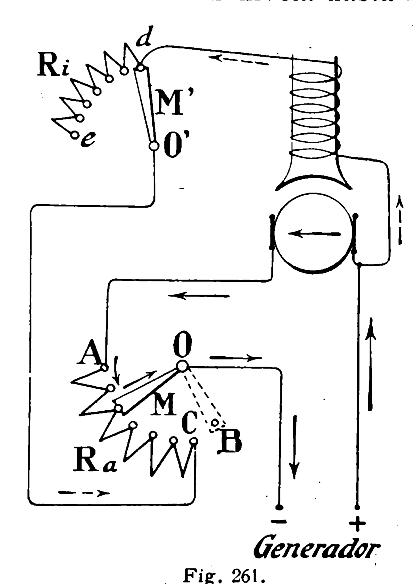


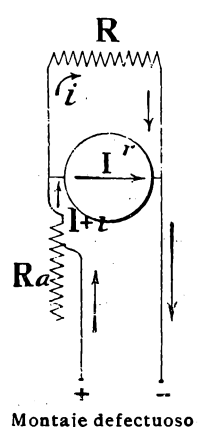
Fig. 261.

Para aumentar esta velocidad, bastará correr la manivela *M'* del regulador de inducción hacia *e*, de manera que disminuya el campo inductor.

Observación I.—Se hubiera podido unir el eje *O'* de la manivela del reostato de arranque con el eje *O* del regulador de inducción, lo cual hubiera evitado el dejar durante la marcha las resistencias del regulador de inducción en serie con la excitación. Pero hay que tener presente que estas últimas resistencias son pequeñas y que la corriente de excitación es también muy débil; el inconveniente no es, pues, muy grande. En cambio, adoptando el montaje indicado, se ve que, en el momento de la ruptura, el circuito de los inductores queda cerrado sobre el inducido, de modo que, al parar, se evitará la chispa de ruptura debida a la gran auto-inducción del devanado inductor: la energía alma-

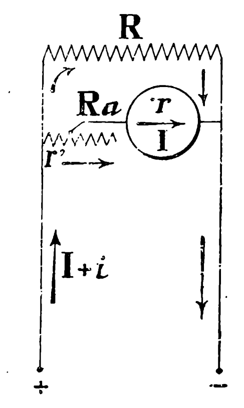
cenada por esta auto-inducción se disipará en efecto Joule en este circuito cerrado y no en chispa.

Observación II. — Puede suceder que equivocadamente se una el eje O' de la manivela M' con el contacto A; en este caso el reostato de arranque se encuentra en serie con el circuito inductor y con el inducido. El motor está protegido contra una corriente



Montaje defectuoso

r es despreciable comparada con R; i es muy pequeña: el motor no arranca.



Montaje correcto

A la resistencia r se suma, al arrancar, la del reostato r', y la corriente i es suficiente para que el motor arranque.

Fig. 262.

excesiva al arrancar; pero como la resistencia del inducido es muy pequeña comparada con la del inductor, la corriente de excitación es muy débil y por consiguiente el flujo Φ. El par motor $K \Phi I$ resulta de muy pequeño valor y en general insuficiente para vencer el par resistente al arrancar; entonces pudiera ocurrirse el avanzar la manivela del reostato de arranque, con lo cual se alcanzaría en el inducido una corriente de intensidad peligrosa (fig. 262).

Observación III.—Según lo anteriormente expues-

to, si se cortara la corriente en la excitación, desaparecería el flujo inductor y por consiguiente adquiriría el motor una velocidad excesiva y por desaparecer la fuerza contra-electromotriz se produciría una corriente peligrosa. Es muy importante evitar que pueda producirse esa ruptura estableciendo con gran cuidado las conexiones del circuito inductor y sobre todo los puntos de unión.

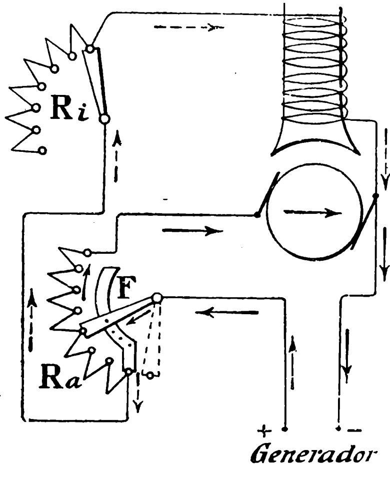


Fig. 263.

Otros dispositivos del reostato de arranque.—1.° *Dispositivo para evitar que el reostato de arranque quede intercalado en el circuito inductor* (figura 263).— Se realiza esta condición mediante la corona metálica *F* que comunica con el primer contacto del reostato de arranque y sobre la cual se apoya constantemente la manivela de este reostato. En estas condiciones, la corriente para circular por la excitación no pasa por el reostato *Ra*, sino por la corona *F*.

2.° *Dispositivo con escape automático en caso de supresión accidental de la excitación.*— La manivela del reostato de arranque tiende a ocupar la posición *O* (figura 264), sobre el punto muerto, bajo la acción de su propio peso o de un muelle. Para mantenerla sobre el contacto superior se utiliza un electroimán recorrido por la corriente de excitación.

Si la excitación queda cortada por cualquier causa,

la atracción cesa y la manivela vuelve a su punto muerto y el motor se para.

3.° *Dispositivo para proteger el motor contra una corriente excesiva ocasionada por una sobre-*

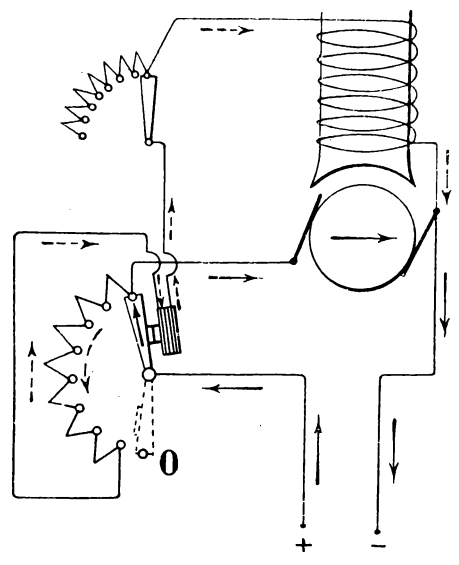


Fig. 264.

carga accidental. — Se coloca un electroimán *E'* en el circuito del inducido (fig. 265); cuando la corriente que lo atraviesa alcanza un valor determinado igual a la intensidad máxima que puede soportar el motor, la pieza de hierro dulce *ab* es atraída por *E'*. Entonces el circuito del electroimán *E* está en corto-circuito y, no pasando por él ninguna corriente, cesa su atracción sobre la manivela *M* que vuelve a su punto muerto, parándose el motor.

4.° *Reostato de arranque con acelerador.* — Ordinariamente se disponen sobre un mismo aparato el reostato de arranque y el regulador de inducción,

teniéndose así un reostato de arranque con acelerador.

Este aparato está representado esquemáticamente en la figura 266.

Se ve que al moverse la manivela *M* en el sentido *F*, la corriente se establece en el inductor gradualmente por las resistencias (1); cuando pasa la corriente

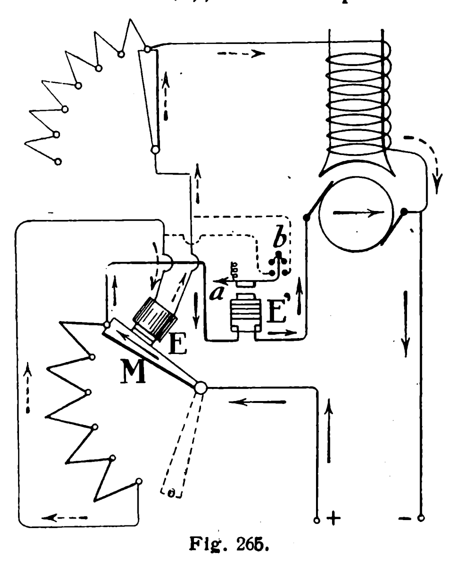


Fig. 265.

máxima por el circuito inductor, se va estableciendo poco a poco sobre el inducido por las resistencias de arranque (2).

Por último, cuando la manivela llega a los contactos correspondientes a las resistencias (3), la corriente pasa directamente al inducido, y a través de estas resistencias, al inductor, de modo que si se sigue avanzando la manivela, aumenta la velocidad.

El papel principal de las resistencias (1) consiste en la disminución progresiva de la corriente inductora al parar el motor, lo cual atenúa considerablemente la chispa de ruptura.

Reostato Vedovelli.—Hay otros aparatos de arranque con diversos dispositivos, entre los cuales citaremos el de Vedovelli, que además de las propiedades que acabamos de estudiar, tiene la de impedir, por

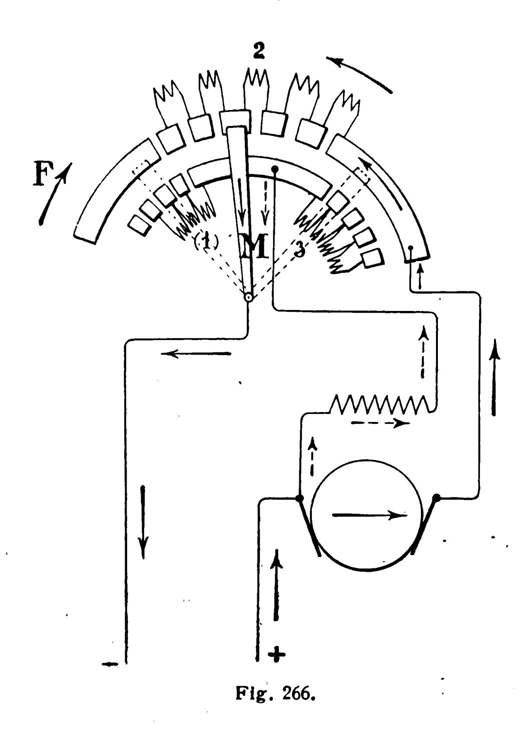


Fig. 266.

medio de dispositivos mecánicos, que la corriente pase al inducido sin haber pasado primero por el inductor.

III. Motores compound.—Un motor compound se monta como un motor shunt, poniendo el regulador de inducción en serie con el devanado shunt.

Propiedades de los motores en una distribución a potencial constante.—I. Motor serie.—El motor está unido a dos conductores, entre los cuales se mantiene

una diferencia de potencial constante (fig. 267). El reostato de arranque está en serie con el motor y para la puesta en marcha se van quitando sucesivamente las resistencias de que consta, de modo que la corriente I va tomando valores crecientes. Como esta corriente pasa por el devanado inductor, el flujo crece a medida que la corriente aumenta. Por otra parte, al arrancar, la corriente es, débil, la inducción del circuito magnético también, y su coeficiente de permeabilidad muy elevado; luego un incremento en la corriente producirá un gran aumento de flujo. El par motor $K \Phi I$ será muy grande al arrancar y aumentará a medida que se supriman resistencias en el reostato.

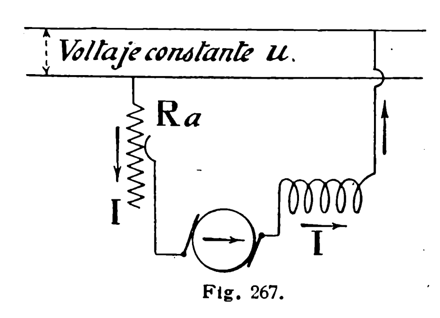


Fig. 267.

La velocidad del motor está dada por la relación ya conocida:

$$N = \frac{u - RI}{n\,\Phi} 10^8,$$

siendo R la resistencia del motor.

Si el par resistente disminuye, se sabe que la corriente I disminuye y, por consiguiente, el flujo Φ. Luego aumentando el numerador y disminuyendo el denominador, la velocidad aumenta rápidamente. Puede suceder, que si el par resistente toma un valor demasiado pequeño, la velocidad sea excesiva y el motor se dispare.

De aquí deducimos que un motor serie en una distribución a potencial constante está caracterizado:

1.° Por un par motor muy grande al arrancar;

2.°, por una velocidad variable, creciente cuando el par resistente disminuye.

Estos motores se emplean en algunos casos particulares, por ejemplo, cuando el par resistente crece con la velocidad, o cuando es necesario obtener un par motor muy grande al arrancar, no temiéndose una velocidad exagerada. Por esta razón se utilizan siempre en la tracción, porque es preciso un par considerable para hacer arrancar los vehículos, y cuando éstos descienden por una pendiente más o menos pronunciada se pueden evitar las velocidades excesivas poniendo, por medio de un conmutador o combinador, resistencias en serie con el motor o cortando completamente la corriente.

II. Motor shunt.—La corriente i en la excitación es constante y tiene por valor $i = \frac{u}{R}$, siendo R la resistencia del circuito inductor (figura 268); el flujo inductor Φ es también constante.

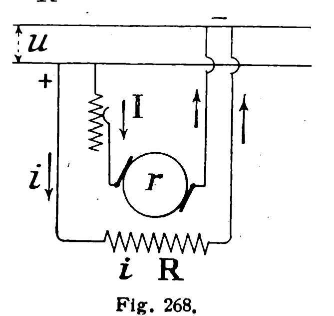


Fig. 268.

La velocidad

$$N = \frac{u - RI}{n\,\Phi} \times 10^8$$

sólo varía con I, por ser Φ y u constantes.

Si el par resistente aumenta, I aumenta y la velocidad disminuye; pero siendo R poco considerable, las variaciones de velocidad producidas por las variaciones de RI son muy débiles. Además, cuando I aumenta, el flujo antagonista aumenta al mismo tiempo, lo cual hace que disminuya el flujo útil Φ, según hemos visto (pág. 309), y este efecto atenúa las variaciones de velocidad.

El par motor $K\Phi I$ no depende más que de la

corriente I, por ser Φ constante; es decir, que aumenta con el par resistente.

Por estas razones, el motor shunt se presta mejor para accionar las máquinas-herramienta que el motor serie; el motor shunt es el motor que más generalmente se emplea.

III. Motor compound. — Si el motor está montado de modo que los flujos producidos por las excitaciones serie y shunt se resten, su velocidad varía poco con la carga, porque si la carga aumenta, I aumenta y también el flujo debido a la excitación serie, que es de sentido contrario al producido por la excitación shunt. El flujo resultante Φ disminuye, luego el numerador y el denominador de la expresión $N = \frac{u - RI}{n\,\Phi} \times 10^8$ disminuyen a la vez y N permanece sensiblemente constante.

Pero hemos visto (pág. 340) que en este caso hay el peligro de que se invierta el sentido de rotación si la carga aumenta demasiado, y este solo inconveniente basta para proscribir el uso de esta clase de motores.

Si las dos excitaciones se suman, la velocidad disminuye con la carga, pero se tiene, gracias a la excitación serie, un par de arranque mayor que con la excitación simplemente shunt.

CAPÍTULO XIV

Alumbrado eléctrico

I.—Lâmparas de arco

Una lámpara de arco consta de dos partes:

1.ª Un sistema de dos barras de carbón, generalmente en prolongación una de otra y entre las cuales se mantiene una diferencia de potencial de 40 a 60 volts.

2.ª Un regulador, cuyo objeto es poner los dos carbones en contacto y después separarlos, manteniéndolos constantemente a la misma distancia a pesar del desgaste que experimentan.

Producción del arco. —Cuando los dos carbones se separan, se produce una chispa que constituye el llamado *arco voltaico.*

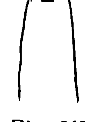


Fig. 269.

Si se observan las barras de carbón (figura 269) proyectándolas sobre una pantalla, o mirándolas a través de un cristal ahumado, se ve que el carbón positivo, es decir, el que está unido al polo positivo del generador de corriente se va ahuecando en forma de cráter, mientras que el carbón negativo se va afilando, terminando en punta; también se ve que del primero salen partículas de carbón que siguiendo el sentido de la corriente se fijan sobre el segundo. Profundizando

en el estudio del arco voltaico, se ha comprobado que el interior del cráter es la región en que la temperatura es más alta, habiéndose evaluado en 3500°, mientras que la temperatura en la punta del carbón negativo es de unos 2700° aproximadamente.

Cuando el arco lleva algún tiempo funcionando, se comprueba que el carbón positivo se gasta dos veces más pronto que el negativo, teniendo ambos el mismo diámetro.

Las mejores condiciones de funcionamiento de una lámpara de arco corresponden a una diferencia de potencial de 38 a 45 volts en sus bornes. El carbón positivo está generalmente colocado en la parte alta, de modo que el cráter envía la luz hacia abajo, y se orienta siempre hacia la región que se quiere iluminar. Se toma el diámetro del carbón negativo menor que el del carbón positivo, porque se gasta más lentamente y porque deja mejor al descubierto el cráter luminoso. Estos diámetros son ordinariamente los siguientes: 13 y 8 milímetros, 14 y 10 milímetros, 17 y 12 milímetros, y la densidad de corriente es en general de 6 a 7 amperes por centímetro cuadrado. La duración de los carbones depende de su longitud y es ordinariamente de ocho a doce horas.

Regulación de los arcos. — Los reguladores tienen por objeto provocar la chispa y mantener una separación conveniente entre los carbones o, mejor dicho, mantener constantes el voltaje y la intensidad de la corriente. Comprenden generalmente una regulación eléctrica, obtenida por la acción atractiva de solenoides y una regulación mecánica que transmite a los carbones los movimientos debidos a las acciones de los solenoides.

I. **Regulación eléctrica.** — Está producida por dos

devanados, uno S de hilo grueso, en serie con los carbones, y otro S' de hilo fino, en derivación entre los carbones (fig. 270). Si la lámpara no funciona, están en contacto los dos carbones; cuando se cierra el interruptor del circuito en que está la lámpara, pasa una corriente muy intensa por los carbones y por el solenoide de hilo grueso; el núcleo de este solenoide es atraído, los carbones se separan y se produce el arco.

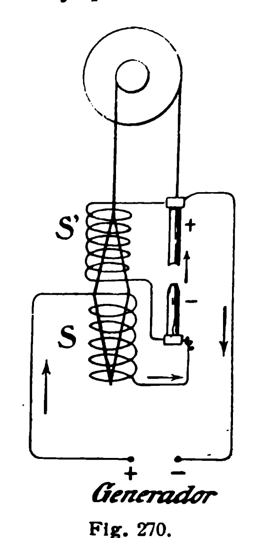


Fig. 270.

Al saltar la chispa, el solenoide de hilo fino no ejerce acción alguna, por estar los dos carbones en contacto y ser su resistencia muy pequeña; por consiguiente, entre estos carbones hay una diferencia de potencial insignificante y una corriente de intensidad despreciable en el solenoide S'.

A medida que los carbones se gastan, el arco se alarga y su resistencia aumenta; la corriente en el solenoide de hilo fino se eleva y actúa sobre el núcleo, haciendo que se acerquen los carbones.

Si se acercan demasiado, la corriente en S aumenta a causa de la disminución de la resistencia del arco, y disminuye en S', sumándose estos efectos y haciendo que los carbones vuelvan a colocarse a distancia conveniente.

II. Regulación mecánica. — Hay muchas clases de lámparas que difieren entre sí por el sistema de regulación mecánica. Sería imposible describirlas todas y estudiar todos los modelos, aun los más corrientes.

Se dividen en cuatro clases:

1.ª *Lámparas equilibradas,* en que los dos carbones se mantienen a distancia conveniente por el simple juego de los solenoides de la regulación eléctrica (lámparas Pilsen, Eck, etc.);

2.ª *Lámparas con freno;* una lámina flexible frena contra un volante impidiendo todo movimiento de avance a los carbones; cuando éstos se gastan, la atracción del núcleo del solenoide de hilo fino atenúa la presión de la lámina y los carbones se acercan; cuando están a distancia conveniente, esta lámina vuelve a poyarse contra el volante deteniendo el movimiento de éste (lámparas Bardon, Vigreux y Brillé, Sautter, Harlé, etc.);

3.ª *Lámparas con escape;* un escape apretado contra una rueda dentada impide el movimiento de los carbones; cuando los carbones se gastan, el arco se hace demasiado largo, el núcleo del solenoide separa el escape y la rueda avanza un diente, acercándose los carbones (lámparas Brianne, Gramme);

4.ª *Lámparas con motor,* que son las grandes lámparas empleadas en los proyectores y reflectores y las lámparas ordinarias alimentadas por corrientes alternas (lámparas Shuckert, etc.).

En casi todas estas lámparas los carbones se acercan por la acción de la gravedad, estando uno de ellos completamente lastrado.

Montaje de las lámparas de arco.—Las tensiones ordinarias en las distribuciones de la energía eléctrica son 110 y 220 volts.

Para una tensión de 110 volts no sería económico emplear una sola lámpara, porque sería preciso, para reducir la tensión entre sus bornes a 45 volts, provocar en una resistencia una caída de tensión de

110 — 45 = 65 volts, y en esta resistencia se perdería una cantidad de energía mayor que la que se utilizaría en la lámpara. Se emplearán, por consiguiente, dos lámparas en serie, y para tener en este caso 45 volts en los bornes de cada una de ellas bastará provocar una caída de tensión igual a 110 — 90 = 20 volts en una resistencia de regulación, en serie con los arcos (fig. 271).

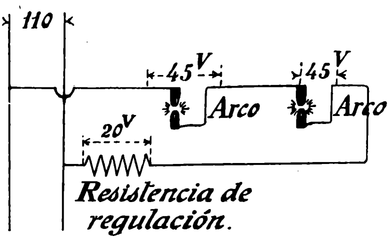


Fig. 271.

Para una tensión de 220 volts se disponen cuatro o cinco lámparas en serie. Para el caso de cinco, se emplearán lámparas que funcionen bajo 40 volts, lo cual exigirá una resistencia de regulación que provoque una caída de tensión de 20 volts.

Consumo.— El consumo de las lámparas de arco varía con la intensidad de la corriente (los arcos de gran intensidad dan mejor rendimiento que los arcos de poca potencia), con la naturaleza de los carbones utilizados, con el diámetro de las barras de carbón y con el número de lámparas en serie sobre una tensión dada.

El consumo es del orden de 0,8 a 1 watt por bujía.

II.—Lámparas de incandescencia

Las lámparas de incandescencia están formadas por filamentos de gran resistencia que se ponen incandescentes al paso de una corriente de suficiente intensidad.

Los filamentos pueden ser de una materia combustible a la temperatura que alcanzan, en cuyo caso han

de estar en el vacío, o bien de una materia refractaria, y entonces pueden ponerse incandescentes en el aire.

Lámparas de filamento combustible. — Estas lámparas son de filamento de carbón o de filamento metálico.

Lámparas con filamento de carbón. — El filamento, sobre cuya fabricación no nos detenemos, tiene la forma de un rizo y está encerrado en una ampolla de vidrio en cuyo interior se ha hecho el

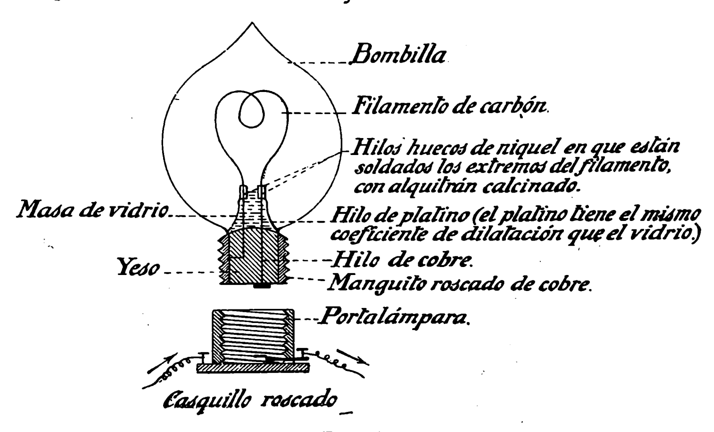
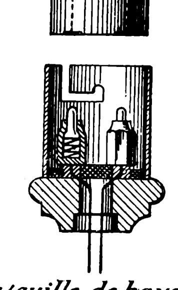


Fig. 272.

vacío, montada sobre un casquillo que puede ser de *rosca* o de *bayoneta* (figs. 272 y 273).

Lámparas de filamento metálico. — Estos filamentos son de metales raros, como el osmio, el tántalo, el tungsteno (en alemán, *Wolfram*)..., que gozan de la propiedad de poder soportar temperaturas superiores a 2000° sin fundirse ni disgregarse y de poder adoptar la forma de hilos muy finos (de 3 a 5 centésimas de milímetro), teniendo en esta forma una resistencia mecánica suficiente. Estos filamentos tienen menor resistencia eléctrica, a igualdad de longitud y de sec-

ción, que los filamentos de carbón; por consiguiente, han de ser mucho más largos y más delgados para poder soportar los mismos voltajes.



Casquillo de bayoneta.

Fig. 273.

Hay una gran variedad de estas lámparas, por ejemplo, las lámparas Tántalo, Osram, Zed, Sirius, etc. (figs. 274 y 275).

Comparación entre las lámparas con filamento de carbón y las de filamento metálico.— El consumo específico, es decir, el consumo de watts por bujía es mucho más elevado en las lámparas de filamento de carbón que en las lámparas de filamento metálico.

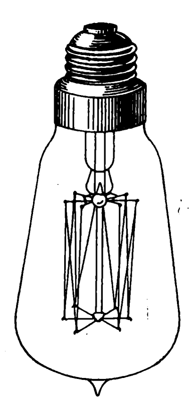


Fig. 274.
Lámpara Tántalo

En las primeras es de 3 a 4 watts por bujía, mientras que en las segundas es de 1 a 1,5 watts.

El consumo *específico* de una lámpara de filamento de carbón disminuye en las primeras horas de estar funcionando y después aumenta constantemente, de tal modo que al cabo de algún tiempo es necesario sustituirlas por otras nuevas; la duración útil no excede de seiscientas a mil horas. Este consumo disminuye cuando el voltaje se eleva, es decir, que desde el punto de vista del ren-

dimiento es conveniente aumentar el voltaje en la lámpara, haciendo que sea algo superior al voltaje para el cual ha sido construída; una elevación de 5 por 100 del voltaje disminuye el consumo específico en un 30 por 100. En cambio, la duración de la lámpara disminuye; por lo tanto, hay un voltaje del cual no se debe pasar. La intensidad luminosa de estas lámparas crece con el voltaje; a una elevación de 4 por 100 del voltaje corresponde un aumento de 27 por 100 del poder iluminante.

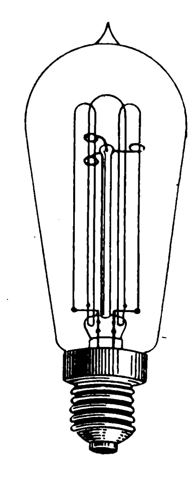


Fig. 275.
Lámpara Osram

Las lámparas de filamento metálico tienen un consumo específico que aumenta muy poco con el tiempo, de modo que pueden emplearse hasta que se rompa su filamento.

El consumo de estas lámparas se reduce mucho menos con la elevación de voltaje que el de las lámparas de filamento de carbón, no habiendo por consiguiente ventaja alguna en elevar el voltaje. Una elevación del 5 por 100 en el voltaje sólo produce una disminución del 12 por 100 en el consumo. El aumento del poder iluminante es también insignificante; un exceso de voltaje del 4 por 100 no produce más que un aumento del 9 por 100 del poder iluminante.

Los filamentos metálicos son más frágiles y duran menos que los filamentos de carbón, pero tienen aproximadamente la misma duración *útil*. Además tienen la propiedad de poderse soldar cuando estando la lámpara en el portalámparas y unida al generador de corriente se ponen en contacto los dos extremos del filamento roto.

Lámpara de filamento refractario: lámpara Nernst. —El filamento de esta lámpara está constituído por una mezcla de óxidos de torio, de zirconio, de cerio, y de itrio, conocidos con el nombre de metales raros. Estos cuerpos no son conductores a las temperaturas ordinarias, pero si ésta se eleva a 600°, se ponen incandescentes y dan una luz muy viva.

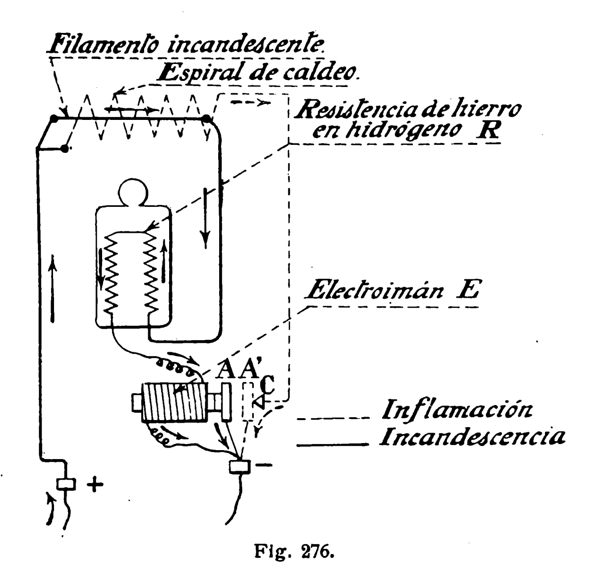


Fig. 276.

La lámpara Nernst está construída del modo indicado esquemáticamente en la figura 276. Antes de empezar a funcionar la lámpara está la armadura del electroimán *E* en la posición *A'* y se apoya contra el contacto *C*. Cuando se cierra el circuito la corriente pasa por la espiral de caldeo *S* (hecha de platino), por el contacto *C* y la armadura *A'*. La espiral *S* llega a ponerse incandescente y calienta al filamento; cuando la temperatura de éste es suficiente se hace conductor y la corriente pasa por él, por la resistencia *R* y por el

electroimán. La armadura es atraída, ocupa la posición *A* y corta la corriente en la espiral de caldeo.

La resistencia del filamento incandescente disminuye cuando su temperatura se eleva, de modo que si se produce un ligero aumento en la c·rriente aumenta la temperatura, lo cual hace disminuir la resistencia y por consiguiente aumentar la corriente. En cambio, una pequeña disminución de la corriente produciría un aumento de resistencia y la corriente continuaría decreciendo hasta hacerse cero. Es decir, que la consecuencia de estas variaciones de resistencia con la temperatura es un funcionamiento irregular de la lámpara. Se remedia este inconveniente poniendo en serie con el filamento incandescente un filamento de hierro cuya resistencia aumenta con la temperatura, haciendo que la resistencia total del circuito permanezca sensiblemente constante.

CAPÍTULO XV

Introducción al estudio de las corrientes alternas

I.—Nociones de cálculo trigonométrico

Por muy elemental que se haga el estudio de las corrientes alternas, son indispensables algunas nociones de cálculo trigonométrico.

En este capítulo estudiaremos algunas relaciones entre las líneas trigonométricas de un ángulo sin buscar la exactitud y la generalización que exigiría un curso de matemáticas.

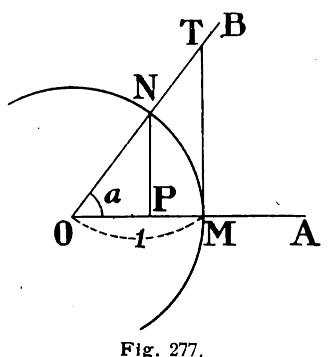


Fig. 277.

Consideremos un ángulo $AOB = a$; desde el vértice O y con un radio igual a 1 tracemos un arco de circunferencia que cortará a OA en M y a OB en N (figura 277).

Se llama *seno* del ángulo AOB a la longitud de la perpendicular NP trazada desde N a OA; es decir:

$$\text{sen } a = NP \qquad (\text{seno } a = NP).$$

Se llama *coseno* de este ángulo a la longitud OP:

$$\cos a = OP \qquad (\text{coseno } a = OP).$$

La tangente en M a la circunferencia corta a OB en T y se llama *tangente* del ángulo AOB a la longitud MT:

$$\text{tg } a = MT \qquad (\text{tangente } a = MT).$$

Se sabe que en un triángulo rectángulo el cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los catetos, luego:

$$\overline{NP}^2 + \overline{OP}^2 = \overline{ON}^2.$$

Ahora bien, NP es igual al seno de a, luego $\overline{NP}^2$ es el cuadrado de sen a, que se escribe sen² a y que se lee seno cuadrado a; análogamente $\overline{OP}^2$ es igual al cuadrado de cos a, que se escribe cos² a y que se lee coseno cuadrado a; por último $ON = 1$ y $\overline{ON}^2 = 1$.

Se tiene, pues:

$$\text{sen}^2 a + \cos^2 a = 1.$$

De donde se deduce, que *la suma de los cuadrados del seno y del coseno de un ángulo cualquiera es igual a* 1. — Por otra parte, los dos triángulos OMT y OPN son semejantes, y se tiene:

$$\frac{TM}{OM} = \frac{NP}{OP},$$

es decir:

$$\frac{\text{tg } a}{1} = \frac{\text{sen } a}{\cos a}, \qquad \text{o bien} \qquad \text{tg } a = \frac{\text{sen } a}{\cos a}.$$

Por consiguiente, *la tangente de un ángulo cualquiera es igual al cociente del seno por el coseno de este ángulo.*

Valores de las líneas trigonométricas de algunos ángulos. — Es fácil ver que si el ángulo a es cero, es decir, si ON se confunde con OM, se tiene:

$$NP = 0, \qquad \text{sen } 0 = 0$$

y

$$OP = OM = 1, \qquad \cos 0 = 1,$$
$$MT = 0, \qquad \text{tg } 0 = 0.$$

Si $a = 90°$, ON se confunde con OR, perpendicular a OM y se tiene (fig. 278):

$$NP = OR = 1, \qquad \text{sen } 90° = 1,$$
$$OP = 0, \qquad \cos 90° = 0.$$

La tangente MT es paralela a OR y por consiguiente se hace infinitamente grande cuando el

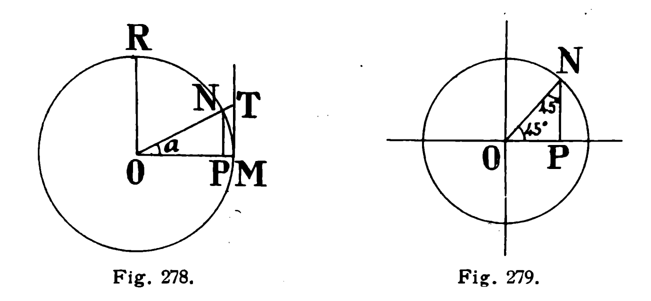


Fig. 278. Fig. 279.

ángulo a es igual a 90°; luego tg 90° es infinitamente grande; se dice que tg 90° es *infinito* y se escribe del modo siguiente:

$$\text{tg } 90° = \infty.$$

Se comprende con facilidad que el seno y el coseno de un ángulo son siempre menores que 1.

Cálculo de sen 45° y cos 45° (fig. 279).—Sea el ángulo $PON = 45°$; el ángulo ONP es también igual a 45°; el triángulo OPN es isósceles y $OP = NP$, luego:

$$\text{sen } 45° = \cos 45°;$$

pero hemos visto que:

$$\text{sen}^2 45° + \cos^2 45° = 1,$$

y, como cos 45° = sen 45°, se deduce:

$$2\ \mathrm{sen}^2\ 45^\circ = 1, \qquad \mathrm{sen}^2\ 45^\circ = \frac{1}{2};$$

de donde:

$$\mathrm{sen}\ 45^\circ = \sqrt{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}},$$

$$\text{o sea} \qquad \mathrm{sen}\ 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2} \times \sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Del mismo modo:

$$\cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Cálculo de cos 60° (fig. 280). —Sea $MON = 60^\circ$. Se tiene, cos 60° = OP. Describiendo sobre ON como diámetro un círculo, pasará por P, por ser el ángulo $OPN = 90^\circ$.

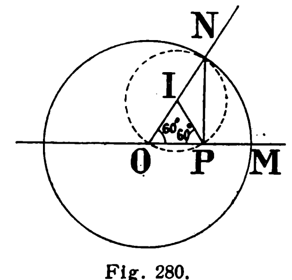


Fig. 280.

Unamos el centro I, punto medio de ON, con el punto P; se tiene $IP = OI$, por ser radios de un mismo círculo y el triángulo OIP resulta ser isósceles. Ahora bien, el ángulo O es igual a 60°, luego el ángulo OPI es también igual a 60°; la suma de estos dos ángulos vale 120°, y como la suma de los tres ángulos de un triángulo es igual a 180°, el tercer ángulo OIP valdrá:

$$180 - 120 = 60^\circ.$$

El triángulo OIP es equilátero, por tener sus tres ángulos iguales, luego $OI = OP$. Pero $OI = \frac{ON}{2}$,

y como $ON = 1$, resulta $OI = \frac{1}{2}$, luego $OP = \frac{1}{2}$, es decir, que:

$$\cos 60^\circ = \frac{1}{2}.$$

Cálculo de sen 60°.—Hemos visto que:

$$\operatorname{sen}^2 60^\circ + \cos^2 60^\circ = 1, \quad \text{de donde} \quad \operatorname{sen}^2 60^\circ = 1 - \cos^2 60^\circ.$$

Siendo $\cos 60^\circ = \frac{1}{2}$, $\cos^2 60^\circ$ será igual a $\frac{1}{4}$ y se tendrá:

$$\operatorname{sen}^2 60^\circ = 1 - \frac{1}{4} = \frac{3}{4},$$

$$\operatorname{sen} 60^\circ = \sqrt{\frac{3}{4}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{4}} = \frac{\sqrt{3}}{2};$$

es decir, que:

$$\cos 60^\circ = \frac{1}{2} \quad \text{y} \quad \operatorname{sen} 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Conociendo la tangente de un ángulo, calcular su seno y su coseno.—Sea un ángulo cualquiera a; hemos visto que:

$$(1) \qquad \operatorname{tg} a = \frac{\operatorname{sen} a}{\cos a} \quad \text{y que:} \quad \operatorname{sen}^2 a + \cos^2 a = 1. \qquad (2)$$

Elevando al cuadrado la primera igualdad y despejando $\cos^2 a$ en la segunda:

$$\operatorname{tg}^2 a = \frac{\operatorname{sen}^2 a}{\cos^2 a};$$

$$\cos^2 a = 1 - \operatorname{sen}^2 a,$$

luego:

$$\mathrm{tg}^2\, a = \frac{\mathrm{sen}^2\, a}{1 - \mathrm{sen}^2\, a},$$

de donde:

$$\mathrm{tg}^2\, a\, (1 - \mathrm{sen}^2\, a) = \mathrm{sen}^2\, a,$$

$$\mathrm{tg}^2\, a - \mathrm{tg}^2\, a \times \mathrm{sen}^2\, a = \mathrm{sen}^2\, a,$$

$$\mathrm{tg}^2\, a = \mathrm{sen}^2\, a + \mathrm{sen}^2\, a \times \mathrm{tg}^2\, a = \mathrm{sen}^2\, a\, (1 + \mathrm{tg}^2\, a)$$

y despejando $\mathrm{sen}^2\, a$:

$$\mathrm{sen}^2\, a = \frac{\mathrm{tg}^2\, a}{1 + \mathrm{tg}^2\, a},$$

$$\mathrm{sen}\, a = \frac{\mathrm{tg}\, a}{\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2\, a}}.$$

Para calcular $\cos a$ se parte de la igualdad (2):

$$\mathrm{sen}^2\, a = 1 - \cos^2 a,$$

y sustituyendo este valor en $\mathrm{tg}^2\, a = \dfrac{\mathrm{sen}^2\, a}{\cos^2 a}$, se tiene:

$$\mathrm{tg}^2\, a = \frac{1 - \cos^2 a}{\cos^2 a};$$

de donde:

$$\mathrm{tg}^2\, a \times \cos^2 a = 1 - \cos^2 a,$$

$$\mathrm{tg}^2\, a \times \cos^2 a + \cos^2 a = 1,$$

$$\cos^2 a\, (1 + \mathrm{tg}^2\, a) = 1,$$

$$\cos^2 a = \frac{1}{1 + \mathrm{tg}^2\, a},$$

$$\cos a = \frac{1}{\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2\, a}}.$$

Valores de las líneas trigonométricas de la suma o diferencia de dos ángulos en función de las líneas trigonométricas de estos ángulos.

$$\text{sen}\,(a+b) = \text{sen}\,a \cos b + \cos a \,\text{sen}\,b$$
$$\text{sen}\,(a-b) = \text{sen}\,a \cos b - \cos a \,\text{sen}\,b$$
$$\cos\,(a+b) = \cos a \cos b - \text{sen}\,a \,\text{sen}\,b$$
$$\cos\,(a-b) = \cos a \cos b + \text{sen}\,a \,\text{sen}\,b$$
$$\text{tg}\,(a+b) = \frac{\text{tg}\,a + \text{tg}\,b}{1 - \text{tg}\,a\,\text{tg}\,b}$$
$$\text{tg}\,(a-b) = \frac{\text{tg}\,a - \text{tg}\,b}{1 + \text{tg}\,a\,\text{tg}\,b}.$$

Relación entre los ángulos y los lados de un triángulo rectángulo. — Consideremos un triángulo rectángulo CBA (fig. 281). Desde el punto C como centro, describamos un círculo que cortará a CA en M y a CB en N; sabemos que, por definición, el seno del ángulo C es NP, su coseno CP, y su tangente MT; es decir, que sen $C = NP$, cos $C = CP$, tg $C = MT$.

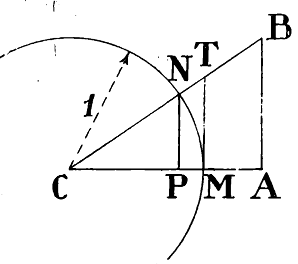


Fig. 281.

Los dos triángulos CNP y CBA son semejantes, luego:

$$\frac{BA}{NP} = \frac{CB}{CN}, \quad \text{o sea} \quad \frac{BA}{\text{sen}\,C} = \frac{CB}{1};$$

de donde:

(1) $$BA = CB \times \text{sen}\,C.$$

Análogamente se tiene:

$$\frac{CA}{CP} = \frac{CB}{CN}, \quad \text{o bien} \quad \frac{CA}{\cos C} = \frac{CB}{1};$$

de donde:

(2) $$CA = CB \times \cos C.$$

Los dos triángulos CMT y CAB son también semejantes, luego:

$$\frac{AB}{MT} = \frac{CA}{CM}, \qquad \text{o sea} \qquad \frac{AB}{\operatorname{tg} C} = \frac{CA}{1};$$

de donde:

(3) $$AB = CA \times \operatorname{tg} C.$$

Por consiguiente:

Un cateto de un triángulo rectángulo es igual a la hipotenusa multiplicada por el seno del ángulo opuesto a dicho cateto (1).

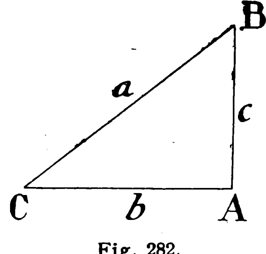


Fig. 282.

Un cateto de un triángulo rectángulo es igual a la hipotenusa multiplicada por el coseno del ángulo comprendido (2).

Un cateto de un triángulo rectángulo es igual al otro cateto multiplicado por la tangente del ángulo opuesto al primero (3).

Por lo tanto, si a, b, c son los tres lados de un triángulo rectángulo, opuestos a los ángulos A, B, C (siendo a la hipotenusa), se tienen las siguientes relaciones (fig. 282):

$$a^2 = b^2 + c^2;$$

$$\begin{cases} c = a \operatorname{sen} C, \\ c = a \cos B, \end{cases}$$

$$\begin{cases} b = a \operatorname{sen} B, \\ b = a \cos C, \end{cases}$$

$$\begin{cases} b = c \operatorname{tg} B, \\ c = b \operatorname{tg} C. \end{cases}$$

Es evidente que *a sen C* es igual a *a cos B*, por ser ambos valores iguales a c, es decir, que:

$$a \operatorname{sen} C = a \cos B \qquad \text{y} \qquad \operatorname{sen} C = \cos B.$$

Pero B y C son complementarios:

$$B + C = 90^\circ, \qquad B = 90^\circ - C;$$

por consiguiente:

$$\text{sen } C = \cos (90^\circ - C).$$

Análogamente:

$$\cos C = \text{sen } (90^\circ - C).$$

Luego el coseno del complemento de un ángulo es igual al seno de este ángulo.

Con estas nociones de cálculo trigonométrico tenemos bastante para emprender el estudio de las corrientes alternas.

II.—Funciones periódicas.—Función sinusoidal. Sus representaciones

Se dice que una magnitud es *función del tiempo* cuando toma valores que varían con el tiempo, pero determinados para cada valor determinado del tiempo.

La función queda definida cuando se conoce la relación que permite calcular su valor para cada valor dado del tiempo.

Por ejemplo, el camino recorrido por un móvil es una función del tiempo: cuando este móvil está animado de un movimiento uniformemente variado, la relación entre el camino y y el tiempo t es:

(1) $$y = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2,$$

en que v_0 es la velocidad que posee el móvil al empezar a contar el tiempo y g es la aceleración del movimiento.

Supongamos, por ejemplo, un proyectil lanzado

con una velocidad inicial $v_0 = 4$ metros por segundo y que toma un movimiento tal, que su velocidad crece en $g = 10$ metros por segundo, en cada segundo (aceleración); al cabo del tiempo $t = 3$ segundos el camino recorrido por el proyectil será:

$$y = 4 \times 3 + \frac{1}{2} 10 \times 3^2,$$

$$y = 12 + 45 = 57 \text{ metros.}$$

El camino recorrido es por consiguiente una función del tiempo, definida por la relación (1).

Función periódica del tiempo.—Es una función particular del tiempo que goza de la propiedad siguiente:

Si para el tiempo t_1 la función es y_1, hay un intervalo de tiempo T que sumado sucesivamente a t_1 no hace variar la función, es decir, que y_1 tiene el mismo valor para todos los tiempos resultantes, tales como $t_1 + T$, $t_1 + 2T$, $t_1 + 3T$, ..., $t_1 + nT$, cualquiera que sea t_1.

Por consiguiente, la función toma el mismo valor, después de cada intervalo de tiempo igual a T.

El valor T de este intervalo se llama *período* de la función.

Se llama *frecuencia* de la función al número de períodos por segundo; la representaremos en lo sucesivo por N.

De estas definiciones resulta que:

$$T \times N = 1 \text{ segundo},$$

puesto que en un segundo hay N períodos y cada período dura una fracción T de segundo, de donde:

$$T = \frac{1}{N}, \qquad N = \frac{1}{T}.$$

EJEMPLO.—Sea un móvil que recorre una circunferencia O (fig. 283) con una velocidad constante de N vueltas por segundo, es decir, con una velocidad tal, que la duración de una vuelta es de $T = \frac{1}{N}$ de segundo.

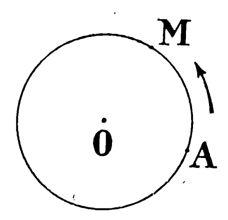


Fig. 283.

Si M es la posición del móvil en un cierto tiempo t_1, al cabo de los tiempos $t_1 + T$, $t_1 + 2\,T$, $t_1 + + 3\,T$, etcétera, es decir, después de 1, 2, 3,... vueltas, la posición del móvil será evidentemente la misma y la distancia de un punto fijo A a M tendrá el mismo valor para estos tiempos diferentes. Luego la distancia entre un punto fijo A de la circunferencia y la posición del móvil, es una función periódica del tiempo, cuya frecuencia es N.

Función sinusoidal del tiempo o función periódica simple.—La más sencilla de las funciones periódicas es la función sinusoidal. Podemos representarnos esta función del modo siguiente:

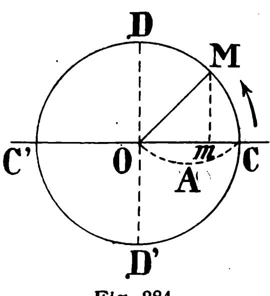


Fig. 284.

Supongamos el móvil M recorriendo la circunferencia de radio A con movimiento uniforme, con una velocidad de N vueltas por segundo, y consideremos el valor Om de la proyección del radio OM sobre un diámetro fijo CC' (fig. 284).

Esta longitud Om es una función periódica del tiempo, porque al cabo de los tiempos t_1, $t_1 + T$, $t_1 + 2\,T$, ..., el móvil tendrá la misma posición sobre la circunferencia, y la proyección Om tendrá el mismo valor.

Consideraremos el valor de Om como positivo cuando esté dirigido en el sentido OC y como negativo cuando esté dirigido en el sentido inverso OC'.

Cuando M se mueve en el sentido de la flecha y recorre la circunferencia partiendo de C, la función Om parte del valor $OC = A$ y decrece hasta 0, habiendo recorrido entonces el móvil un cuarto de circunferencia, es decir, al cabo del tiempo $t = \frac{T}{4}$. Esta función sigue decreciendo desde 0 hasta $-A$, valor que alcanza cuando el móvil está en C', es decir, al cabo del tiempo $\frac{T}{2}$. Por último, al variar el tiempo de $\frac{T}{2}$ a $\frac{3T}{4}$, la función de Om crece de $-A$ a 0, y entre $\frac{3T}{4}$ y T sigue creciendo de 0 a $+A$. Después vuelve a pasar por todos los valores anteriores cuando el móvil recorre por segunda vez la circunferencia, es decir, al cabo de un intervalo de tiempo T; y lo mismo, después de los intervalos $2T$, $3T$, etc.

Una función de esta clase recibe el nombre de función sinusoidal y varía, como hemos visto, de un modo continuo entre $+A$ y $-A$.

Representaciones gráficas. — *Primera representación.*—Sobre una recta indefinida OX (fig. 285), se toman longitudes proporcionales a los diferentes valores del tiempo correspondientes a las distintas posiciones del punto M sobre la circunferencia O; por los puntos obtenidos se trazan perpendiculares a OX sobre las cuales se toman longitudes proporcionales a los valores correspondientes de la función Om. Uniendo por un trazo continuo los diferentes puntos así obtenidos, se tendrá una curva que figurará las variaciones de Om con el tiempo. Se dice que esta curva repre-

senta la función Om. Su forma es la traducción gráfica de la tabla siguiente, que resulta del razonamiento anterior.

Tiempo T	Func. $y = Om$	Tiempo T	Func. $y = Om$
0	A	T	$+A$
crece	decrece	crece	decrece
$\frac{T}{4}$	0	$T+\frac{T}{4}$	0
crece	decrece	crece	decrece
$\frac{T}{2}$	$-A$	$T+\frac{T}{2}$	$-A$
crece	crece	crece	crece
$\frac{3T}{4}$	0	$T+\frac{3T}{4}$	0
crece	crece	....	....

Esta curva se llama sinusoide.

Segunda representación. — Según hemos visto, la curva representativa de la función considerada está

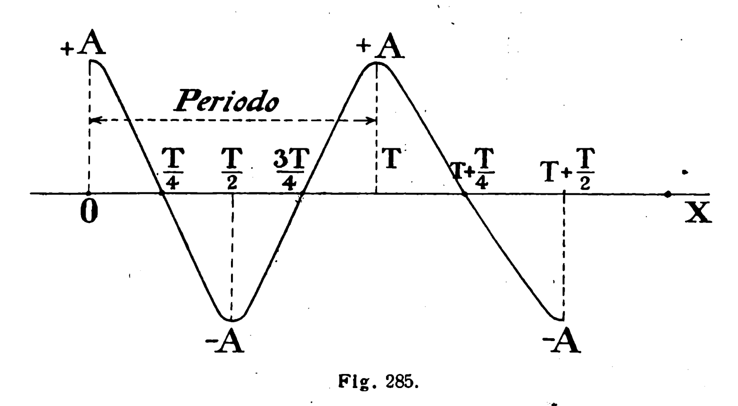


Fig. 285.

perfectamente determinada conociendo el radio A del círculo sobre el cual se mueve el punto M y el período, es decir, la duración T de una revolución.

Esta función podrá representarse simplemente por una recta de longitud $OM = A$ (fig. 286). En efecto, para tener el valor de la función en un instante dado t_1, bastará formar sobre la recta $O\,M$ un ángulo igual al movimiento angular del punto M durante el tiempo

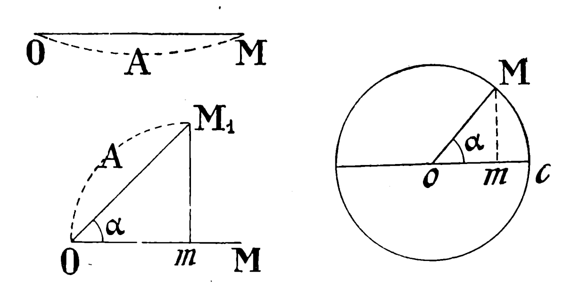


Fig. 286

considerado t_1, tomar sobre la recta resultante una longitud OM_1 igual a A y bajar desde el punto M_1 una perpendicular M_1m a $O\,M$; la longitud Om dará el valor de función al cabo del tiempo t_1.

Supongamos, por ejemplo, que el punto M recorre la circunferencia con una velocidad de 20 vueltas por segundo (frecuencia $N = 20$); la duración de una vuelta será $\frac{1}{20}$ de segundo (período $T = \frac{1}{20}$). Supongamos, además, que el radio de la circunferencia sea de 3 metros. Determinemos el valor de la función Om, definida como acabamos de indicar, al cabo del tiempo $t_1 = \frac{1}{100}$ de segundo.

Para ello, determinaremos el valor del movimiento angular del móvil durante el tiempo $\frac{1}{100}$. En $\frac{1}{20}$ de segundo, el móvil recorre la circunferencia, es decir,

su movimiento angular es de 360°; luego en un segundo este movimiento será:

$$360 : \frac{1}{20} = 360 \times 20,$$

y en $\frac{1}{100}$ de segundo,

$$360 \times 20 \times \frac{1}{100} = 72^\circ.$$

Por consiguiente, se construye sobre la recta $O\,M$ un ángulo de 72° (fig. 287); se toma sobre la recta que así resulta una longitud $O\,M_1$ de 3 metros, en la escala

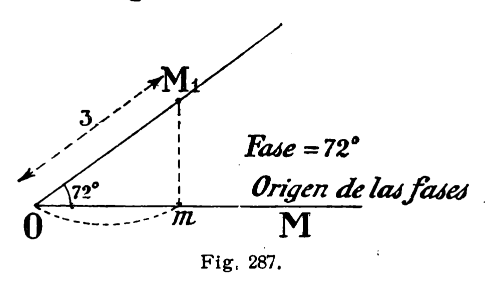


Fig. 287.

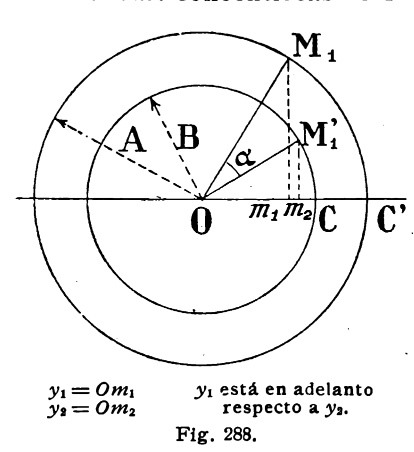
adoptada, y se traza M_1m, perpendicular a $O\,M$; la longitud Om, medida en la misma escala, dará el valor de la función al cabo del tiempo $t_1 = \frac{1}{100}$ de segundo.

De este modo, una función sinusoidal podrá representarse gráficamente por una recta de longitud dada igual a su valor máximo, frente a la cual se indicará el valor de la frecuencia o del período. Esta recta recibe el nombre de *vector*.

El ángulo que con $O\,M$ forma la recta OM_1 cuya proyección sobre OM da el valor de la función, es la *fase de la función* para el tiempo t_1.

El vector $O\,M$ representa la función en la fase cero, es decir, en el *origen de las fases*.

Representación de dos funciones sinusoidales del mismo período.—Sean dos funciones sinusoidales que tienen el mismo período T y cuyos valores máximos son A y B respectivamente (fig. 288). Estas funciones pueden determinarse suponiendo dos móviles M y M' que recorren con la misma velocidad angular, es decir, empleando el mismo tiempo en una revolución, dos circunferencias concéntricas de radios A y B respectivamente. Los valores de estas funciones estarán dados para cada instante por las proyecciones Om_1 y Om_2 de los radios OM_1 y OM'_1, siendo M_1 y M'_1 las posiciones sobre las circunferencias respectivas, de los dos móviles M y M' en el instante considerado t_1.



$y_1 = Om_1$ $y_2 = Om_2$ y_1 está en adelanto respecto a y_2.

Fig. 288.

Por ser iguales las velocidades angulares de los dos móviles, su distancia angular $M_1OM'_1$ será siempre la misma. Por consiguiente, siendo la fase del primero COM_1 y la del segundo COM'_1, su diferencia de fase medida por $M_1OM'_1$ es constante; sea α este ángulo.

Se dice que la función $y_1 = Om_1$ está en *adelanto* o en *retraso* respecto a la función $y_2 = Om_2$, según que el ángulo COM_1 sea mayor o menor que el ángulo COM'_1; en el caso de la figura 288, y_1 está en *adelanto* respecto a y_2.

Esta diferencia de fase recibe el nombre de defasaje de la función y_1 sobre la función y_2.

Supongamos por ejemplo que la función y_1 esté en *adelanto* sobre la función y_2, en un ángulo α.

Se ve que la función y_1 pasará por 0 y por los valores máximos, positivos y negativos $+A$ y $-A$, un cierto tiempo antes que y_2; este tiempo θ es el tiempo que tardan los móviles M y M' en describir el ángulo α. Como durante el tiempo T (período) cada uno de estos dos móviles efectúa una revolución completa, es decir, recorren el ángulo 2π, para recorrer la unidad de ángulo necesitarán el tiempo $\frac{T}{2\pi}$ y para recorrer el ángulo α, el tiempo

$$\theta = \frac{T \times \alpha}{2\pi}.$$

Las dos funciones y_1, y_2 estarán representadas por las dos sinusoides de la figura 289.

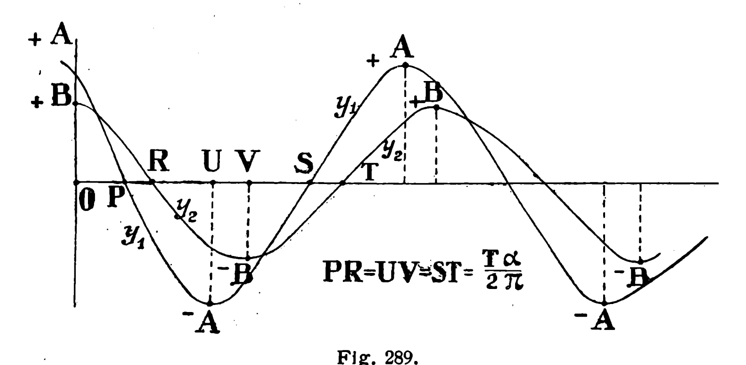


Fig. 289.

En esta figura vemos que y_1 pasa por 0 al cabo de los tiempos medidos por OP, OS.... e y_2 al cabo de los tiempos OR, OT,... es decir, *después* que y_1, y que este retraso está medido por PR, ST,... Del mismo modo, y_2 pasa por sus valores máximos *después* que y_1 y este retraso medido por UV,... es el mismo que el anterior:

es decir, que y_2 está *retrasada* respecto a y_1, o bien y_1 está *adelantada* respecto a y_2, en un ángulo α o en un tiempo $\theta = \frac{T\alpha}{2\pi}$.

También pueden representarse estas dos funciones por dos vectores.

Si se toma la fase de y_2 por origen de las fases, se representará y_2 por un vector OM' cuya longitud es B; la fase de y_1 será entonces α, y estando y_1 defasada en adelanto sobre y_2, estará representada por un vector que formará con OM' un ángulo α, tomando sobre este vector una longitud $OM = A$ (fig. 290). El ángulo α se cuenta a partir de OM' en sentido contrario al movimiento de las agujas de un reloj que tomamos como sentido de los arcos positivos.

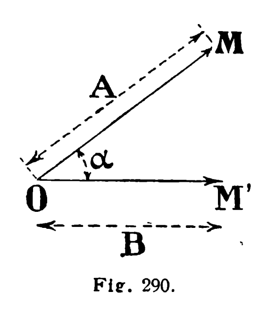


Fig. 290.

Si se quiere tener, por ejemplo, el valor de estas dos funciones al cabo de un tiempo dado t, se forma, como hemos indicado, un ángulo $a = \frac{2\pi \times t}{T}$ con OM' y se toma $OM'_1 = B$; después se forma con OM el mismo ángulo a y se toma $OM'=A$: las longitudes de las proyecciones Om_1 y Om'_1 representan respectivamente los valores de las funciones y_1 y y_2 al cabo del tiempo t (fig. 291).

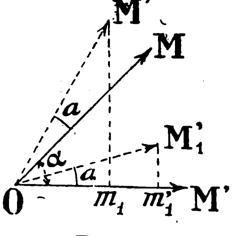


Fig. 291.

CASOS PARTICULARES. — I. *Las dos funciones están defasadas de 90°, es decir, de un cuarto de período.* — Estarán representadas de los dos modos siguientes:

1.° Por dos sinusoides (fig. 292);

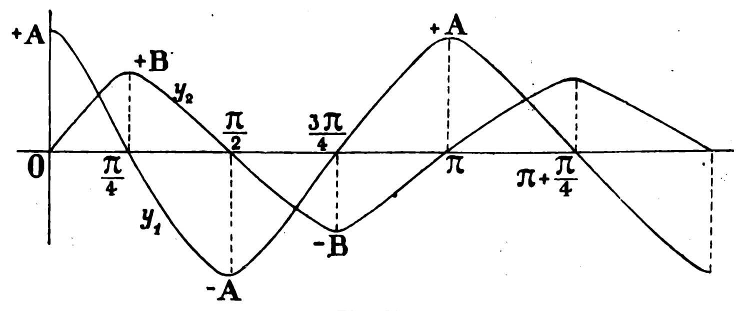


Fig. 292.

2.° Por dos vectores (fig. 293): y_1 está defasada en adelanto sobre y_2 de $\frac{1}{4}$ de período.

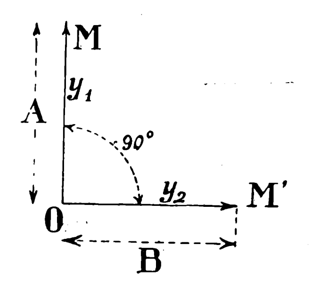


Fig. 293.

Dos funciones en estas condiciones se dice que están *en cuadratura.*

II. *Las dos funciones están defasadas de 180°, o sea de un semiperíodo.* — Estarán representadas de los dos modos siguientes:

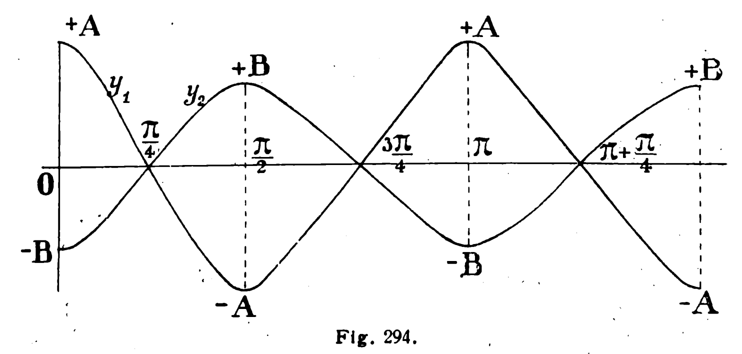


Fig. 294.

1.° Por dos sinusoides (fig. 294);

2.° Por dos vectores (fig. 295):

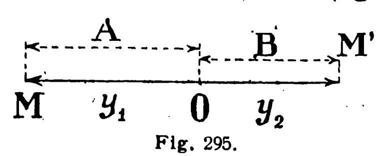


Fig. 295.

y_1 está defasada en adelanto sobre y_2 de 180°, es decir, de un semiperíodo.

Dos funciones en estas condiciones se dice que están *en oposición.*

III. *Las dos funciones están defasadas de un ángulo cero ó 2π.* — Estarán representadas de los dos modos siguientes:

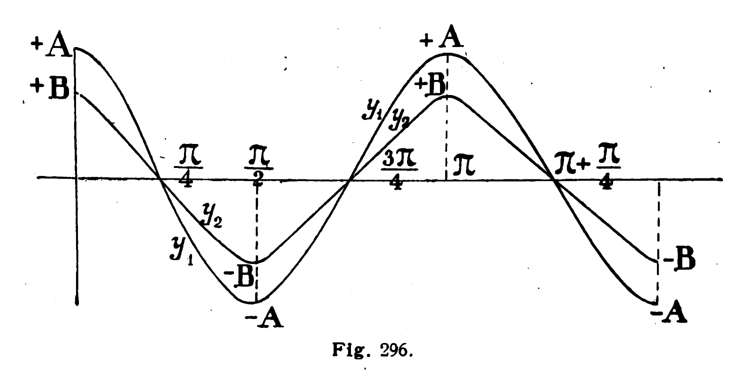


Fig. 296.

1.° Por dos sinusoides (fig. 296);

2.° Por dos vectores (figura 297).

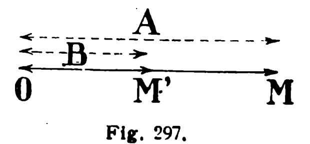


Fig. 297.

Dos funciones en estas condiciones se dice que están en *concordancia de fase* o simplemente *en fase.*

Valores particulares de una función sinusoidal.— 1.° *Valores instantáneos de la función:* son los valores que toma la función para cada valor del tiempo: se determinan sobre la sinusoide que representa la función, tomando sobre el eje OX una longitud OP que

representa el tiempo considerado t_1 en la escala adoptada para la construcción de la sinusoide y trazando la perpendicular en P a OX hasta que corte en M_1 a la curva; el valor instantáneo correspondiente al tiempo t_1 estará medido por la longitud PM_1 (fig. 298).

Ya hemos visto (pág. 379) cómo pueden determinarse los valores instantáneos en la representación por vectores.

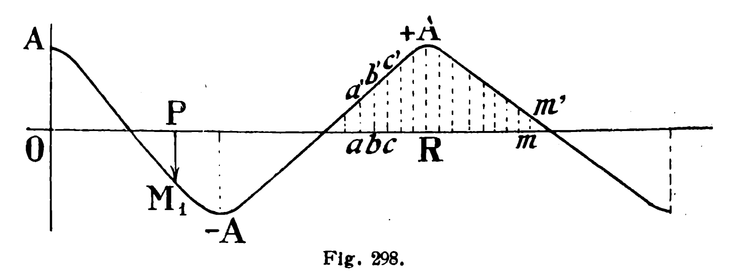


Fig. 298.

2.° *Valor máximo:* es el valor absoluto más grande que toma la función; es independiente del tiempo.

3.° *Valor medio:* es la media de los valores instantáneos que toma la función durante un semiperíodo: es decir, la media de las longitudes aa', bb', ..., cc', mm'.

Se demuestra que esta media es igual al valor máximo RA multiplicado por $\frac{2}{\pi}$, es decir, que

$$\text{valor medio} = \text{valor máximo} \times \frac{2}{\pi} = \text{valor máximo} \times \frac{2}{3{,}1416}.$$

4.° *Valor eficaz:* es la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores instantáneos durante un semiperíodo:

$$\text{valor eficaz} = \sqrt{\text{valor medio de } aa'^2, bb'^2, \ldots, mm'^2}.$$

Se demuestra que:

$$\text{valor eficaz} = \frac{\text{valor máximo}}{\sqrt{2}}.$$

Luego:

$$\text{valor eficaz} = \frac{\text{valor medio}}{\sqrt{2}} \times \frac{\pi}{2}.$$

Suma de dos funciones sinusoidales del mismo período. — Es una función cuyos valores son en cada instante iguales a la suma de los valores de las dos funciones consideradas en el mismo instante; se demuestra que la función suma es también una función sinusoidal.

Primera representación. — Sean y_1, y_2 las dos funciones representadas por las dos sinusoides de la

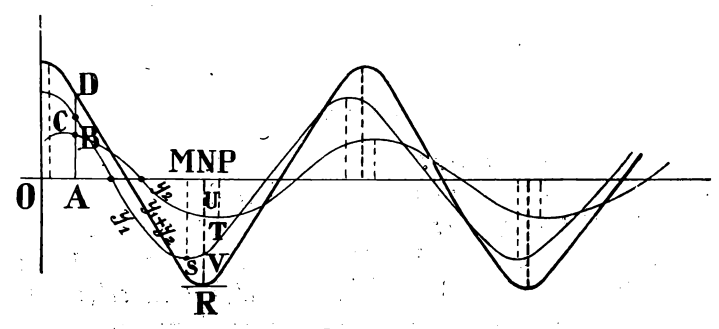


Fig. 299.

figura 299. La sinusoide que representa la suma de estas dos funciones se obtendrá tomando para cada valor del tiempo tal como OA, un valor AD igual a la suma de los valores de y_1 y de y_2 para este mismo valor del tiempo, es decir:

$$AD = AB + AC.$$

Del trazado de esta curva resulta que la función suma de y_1 y de y_2 tiene un valor máximo inferior a la suma de los valores máximos de las funciones y_1, y_2:

$$NR < MS + PT, \quad \text{por ser} \quad NR = NU + NV.$$

Se ve además que la suma está defasada en adelanto sobre una de las funciones y en retraso sobre la otra: en el caso de la figura, en adelanto sobre y_2 y en retraso sobre y_1.

Segunda representación.— Sean A y B los valores máximos de las dos funciones y_1, y_2. Tracemos dos círculos concéntricos de radios A y B. Sabemos que y_1 e y_2 están dadas a cada instante por las proyecciones sobre el diámetro X de los dos radios OM_1 y OM_2; sean M_1 y M_2 las posiciones en el instante considerado, de los dos móviles sobre sus circunferencias respectivas, siendo la duración de una rotación igual al período común de ambas funciones. El ángulo α que forman OM_1 y OM_2 es el defasaje de las dos funciones entre sí. La función suma de y_1 e y_2 tendrá en cada instante por valor $Om_1 + Om_2$ y estará representada por un vector dado por la diagonal OM del paralelogramo construído sobre OM_1 y OM_2 (fig. 300).

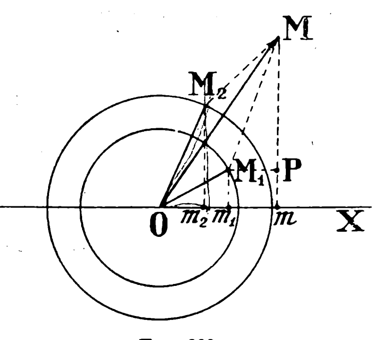


Fig. 300.

En efecto, en el instante en que las funciones y_1 e y_2 tienen por valor Om_1 y Om_2, la función representada por OM tiene por valor la proyección Om de OM. Bastará, pues, demostrar que:

$$Om = Om_1 + Om_2.$$

Se tiene:

$$Om = Om_1 + m_1m. \qquad (1)$$

Tracemos $M_1 P$ paralela a OX:

$$m_1 m = M_1 P.$$

Ahora bien, los dos triángulos $OM_2 m_2$ y $M_1 M P$ son iguales por tener la hipotenusa igual, $OM_2 = M_1 M$ como lados opuestos de un paralelogramo y un ángulo agudo igual $OM_2 m_2 = M_1 M P$ por tener sus lados paralelos; luego:

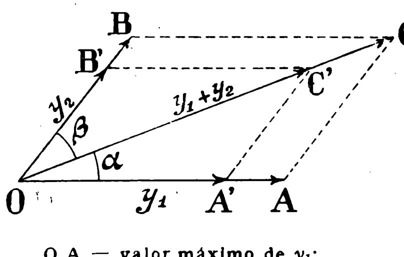
$$Om_2 = M_1 P, \quad \text{o sea} \quad Om_2 = m_1 m;$$

sustituyendo en la igualdad (1) $m_1 m$ por este valor Om_2 se tiene:

$$Om = Om_1 + Om_2.$$

De donde se deduce que para representar una función suma de dos funciones sinusoidales dadas, se procede del modo siguiente:

Se toma la fase de una de las dos funciones como origen de las fases (fig. 301). Esta primera función está entonces representada por un vector horizontal cuya longitud es igual a su valor máximo (se llevará, pues, sobre esta recta una longitud igual a este valor). Se construye sobre este primer vector OA en un sentido conveniente un ángulo igual al defasaje de la segunda función sobre la primera (este ángulo se contará de derecha a izquierda si el defasaje está en



O A = valor máximo de y_1;
O B = — y_2;
O C = — $y_1 + y_2$;
O A' = valor eficaz de y_1;
O B' = — y_2;
O C' = — $y_1 + y_2$.

Fig. 301.

adelanto, y de izquierda a derecha si está en retraso). Sobre el nuevo lado del ángulo se toma a partir de O una longitud OB igual, en la misma escala que para la primera función, al valor máximo de la segunda.

La diagonal OC del paralelogramo construído sobre OA y OB representa la función suma de las dos primeras, y su longitud mide, en la escala adoptada, su valor máximo.

Tomemos sobre OA y OB valores iguales a $\frac{OA}{\sqrt{2}}$ y $\frac{OB}{\sqrt{2}}$ y supongamos que son OA' y OB'; se sabe que $OA' =$ valor eficaz de y_1, $OB' =$ valor eficaz de y_2.

El paralelogramo construído sobre OA' y OB' tiene el cuarto vértice en C' sobre OC, y se tiene:

$$\frac{OC'}{OC} = \frac{OA'}{OA} \quad \text{o bien} \quad \frac{OC'}{OC} = \frac{\frac{OA}{\sqrt{2}}}{OA}, \quad \frac{OC'}{OC} = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Luego OC' es igual al valor eficaz de la suma $y_1 + y_2$. Por consiguiente: *El valor eficaz de una función suma de dos funciones sinusoidales está dado*

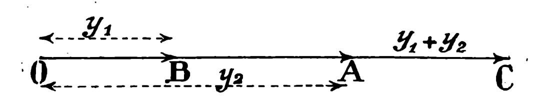


Fig. 302.

por la longitud de la diagonal del paralelogramo construído sobre las longitudes que miden, en la misma escala, los valores eficaces de cada una de ellas y que forman entre sí un ángulo igual al defasaje de las dos funciones.

Esta construcción indica que el valor eficaz OC' de la suma es menor que la suma de los valores eficaces

y que la suma está defasada en adelanto sobre y_1 del ángulo α y en retraso sobre y_2 del ángulo β.

Si las dos funciones están en concordancia de fase, el valor eficaz o el valor máximo de su suma son iguales respectivamente a la suma de los valores eficaces o de los valores máximos de cada uno de ellos. La suma está también en concordancia de fase con cada una de las funciones (fig. 302).

CAPÍTULO XVI

Propiedades de las corrientes alternas

Magnitudes eléctricas alternas

Las corrientes alternas y las fuerzas electromotrices que las producen son funciones periódicas del tiempo. En la construcción de los generadores se hace todo lo posible para que estas funciones sean sinusoidales; admitiremos que estas magnitudes son efectivamente sinusoidales y les aplicaremos las consecuencias de las consideraciones anteriores. Tendremos por lo tanto que considerar los valores siguientes para la intensidad de una corriente:

1.º *Intensidad instantánea,* variable con el tiempo, que representaremos por i;

2.º *Intensidad máxima,* independiente del tiempo, que representaremos por I_{max};

3.º *Intensidad media,* independiente del tiempo, que representaremos por I_{med};

4.º *Intensidad eficaz,* independiente del tiempo, que representaremos por I_{ef}.

Entre estos valores existen las relaciones:

$$I_{med} = I_{max} \times \frac{2}{\pi}, \qquad I_{max} = I_{med} \times \frac{\pi}{2},$$

$$I_{ef} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}, \qquad I_{max} = I_{ef} \times \sqrt{2}, \qquad I_{ef} = \frac{I_{med} \times \pi}{2\sqrt{2}}.$$

Análogamente, para las fuerzas electromotrices:

1.º *F. e. m. instantánea,* variable con el tiempo, e;
2.º *F. e. m. máxima,* independiente del tiempo, E_{max};
3.º *F. e. m. media,* independiente del tiempo, E_{med};
4.º *F. e. m. eficaz,* independiente del tiempo, E_{ef}.

Entre estos valores se tienen las relaciones:

$$E_{med} = E_{max} \times \frac{2}{\pi}, \qquad E_{max} = E_{med} \times \frac{\pi}{2},$$

$$E_{ef} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}}, \quad E_{max} = E_{ef}\sqrt{2}, \quad E_{ef} = E_{med} \times \frac{\pi}{2\sqrt{2}}.$$

Representaremos las diferencias de potencial por u, valor instantáneo; U_{max}, U_{med} y U_{ef}, valor máximo, medio y eficaz. Se tendrán evidentemente entre estas magnitudes las mismas relaciones que entre las fuerzas electromotrices.

Se demuestra que la *intensidad eficaz* de una corriente alterna es igual a la intensidad de la corriente continua que produciría durante el mismo tiempo y en la misma resistencia la misma cantidad de calor.

El valor eficaz de una f. e. m. alterna es igual al valor de la f. e. m. continua que aplicada a los extremos de una resistencia (sin auto-inducción y sin capacidad), produciría en el mismo tiempo la misma cantidad de calor.

Los aparatos de medida, amperímetro y voltímetro, dan los valores eficaces de estas magnitudes.

Relación entre la intensidad eficaz de la corriente que pasa por un circuito y la d. d. p. entre sus extremos. — El problema es el siguiente:

En los extremos de un circuito se aplica una d. d. p. alterna; resulta una corriente alterna del mismo período que la d. d. p.:

1.° ¿Hay defasaje entre la corriente producida y la d. d. p.?; y si lo hay, ¿en qué sentido?, es decir, ¿está la corriente defasada en adelanto o en retraso respecto a la d. d. p.?

2.° ¿Cuál es el valor de la intensidad eficaz de la corriente en función de la d. d. p. aplicada?

Para resolver esta cuestión capital en el estudio de las corrientes alternas estudiaremos primero el problema siguiente:

Un circuito con auto-inducción es recorrido por una corriente alterna, produciéndose una f. e. m. de auto-inducción; ¿cuál es el defasaje de esta f. e. m. sobre la corriente? ¿qué valor tiene esta f. e. m. en función de la corriente?

La corriente produce a través de las espiras que componen el circuito variaciones de flujo, siendo el número de cambios de sentido del flujo por segundo igual a la frecuencia de la corriente.

Estas variaciones de flujo dan origen en este circuito a una fuerza electromotriz, llamada *fuerza electromotriz de auto-inducción,* que es alterna y del mismo período que la que produce las variaciones de flujo, y por consiguiente, de la corriente.

Sea $OABCDE$. . la sinusoide que representa la corriente que circula por el circuito (fig. 303). Sabemos, según la ley de Lenz, que la f. e. m. producida por las variaciones de la corriente tiene un sentido tal, que tiende a oponerse a estas variaciones.

Cuando el tiempo pasa de 0 a $\frac{T}{4}$, la corriente aumenta siguiendo la curva OA; la f. e. m. que resulta tiene un sentido tal, que la corriente que produciría, debiendo oponerse a este aumento, estaría dirigida en sentido inverso del que circula por el circuito.

Por consiguiente, durante este primer intervalo

de tiempo $\frac{T}{4}$, la f. e. m. de auto-inducción es de signo contrario al de la corriente.

Sabemos, además, que el valor de la f. e. m. está dado por la relación:

$$f. e. m. = \frac{\text{variación de flujo}}{\text{duración de la variación}}.$$

Ahora bien, cuando la corriente pasa por su máximo, su variación y por consiguiente la *variación* del

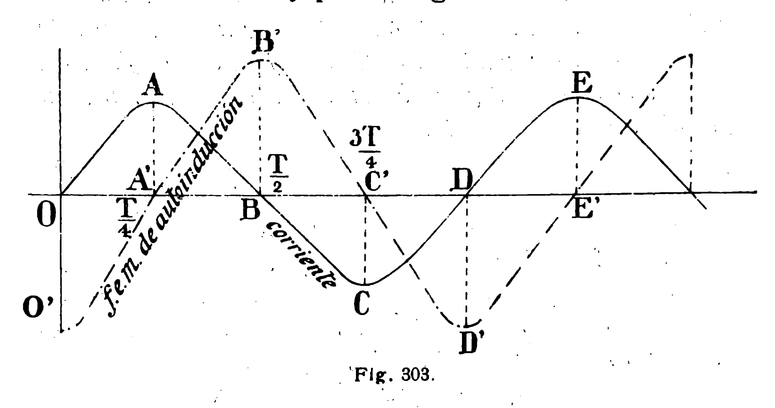


Fig. 303.

flujo es nula, y la f. e. m. de auto-inducción es cero; en cambio, cuando la corriente pasa por cero, su variación es máxima y por lo tanto la del flujo; la f. e. m. de auto-inducción es máxima. Por consiguiente, cuando la corriente describa la curva OA, la f. e. m. de auto-inducción variará y sus variaciones estarán representadas por la parte de curva $O'A'$.

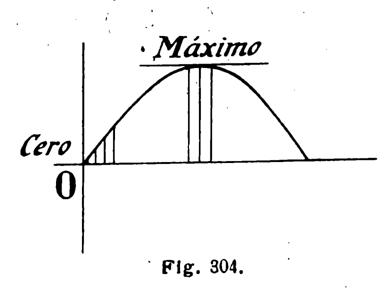


Fig. 304.

En efecto, se ve (fig. 304) que cuando la corriente

pasa por su máximo, su valor es sensiblemente el mismo, un poco antes y un poco después de pasar por dicho máximo (variación nula); al contrario, un poco después de pasar por cero, la corriente toma un valor apreciable (variación máxima).

Del tiempo $\frac{T}{4}$ al tiempo $\frac{T}{2}$, la corriente disminuye siguiendo la línea AB (fig. 303), la f. e. m. resultante de esta disminución tiende a oponerse a la misma, y tendrá el mismo signo que la corriente, es decir, que aumenta desde 0 hasta su valor máximo.

Este razonamiento nos conduce a trazar la curva $A'\ B'\ C'\ D'$, ..., que representa las variaciones de la f. e. m. de auto-inducción, y esta curva indica que esta f. e. m. está defasada de un cuarto de período en atraso sobre la corriente, es decir, en cuadratura en atraso.

Sae $\mathcal{L}$ el valor del coeficiente de auto-inducción del circuito: cuando este circuito es recorrido por la corriente i, el flujo que lo atraviesa es $\mathcal{L}i$ (pág. 223). Ahora bien, durante un semiperíodo, por ejemplo de $\frac{T}{4}$ a $\frac{3T}{4}$, el flujo varía desde el valor $+\mathcal{L}I_{max}$ al valor $-\mathcal{L}I_{max}$; la variación del flujo es por consiguiente:

$$\mathcal{L}I_{max} - (-\mathcal{L}I_{max}) = 2\,\mathcal{L}I_{max},$$

siendo la duración de esta variación $\frac{T}{2}$.

La f. e. m. *media* inducida es (pág. 215):

$$\frac{2\,\mathcal{L}I_{max}}{\frac{T}{2}} = \frac{4\,\mathcal{L}I_{max}}{T}.$$

Por consiguiente, si E'_{med} es el valor medio de esta f. e. m., se tendrá:

$$E'_{med} = \frac{4 \mathcal{L} Imax}{T},$$

luego:

$$E'_{max} = \frac{4 \mathcal{L} Imax}{T} \times \frac{\pi}{2} = \frac{2\pi \mathcal{L} Imax}{T},$$

y

$$E'_{ef} = \frac{2\pi \mathcal{L} Imax}{T\sqrt{2}} = \frac{2\pi \mathcal{L}}{T} \cdot \frac{Imax}{\sqrt{2}},$$

pero:

$$\frac{Imax}{\sqrt{2}} = I_{ef},$$

luego:

$$E'_{ef} = \frac{2\pi \mathcal{L} I_{ef}}{T}.$$

Si N es la frecuencia de la corriente, tendremos:

$$T = \frac{1}{N}$$

y

$$E'_{ef} = \frac{2\pi \mathcal{L} I_{ef}}{\frac{1}{N}} = 2\pi N \mathcal{L} I_{ef}.$$

Por consiguiente:

Cuando un circuito inductivo es recorrido por una corriente alterna, se produce en este circuito una f. e. m. de auto-inducción del mismo período que la corriente, defasada en atraso sobre la corriente de un cuarto de período y cuyo valor eficaz es:

$$E'_{ef} = 2\pi N \mathcal{L} I_{ef}.$$

Teniendo esto presente, consideremos un circuito de resistencia óhmica R y con un coeficiente de auto-inducción $\mathcal{L}$.

Sean, en un instante dado: u el valor de la d. d. p. aplicada en los extremos del circuito, i la corriente y e' la f. e. m. de auto-inducción; la corriente en el circuito considerado está producida en cada instante por las tensiones u y e', luego:

$$i = \frac{u + e'}{R}, \quad \text{de donde} \quad u = Ri - e'.$$

La d. d. p. aplicada es por consiguiente una función sinusoidal, suma de las dos funciones sinusoidales Ri y $-e'$; luego estará representada por la diagonal del paralelogramo construído sobre Ri y $-e'$.

Tomemos por origen de fases la de i (fig. 305); representaremos i por el vector OA, de modo que se tenga:

$$OA = I_{ef}.$$

Fig. 305.

La función Ri pasará por cero y sus máximos, al mismo tiempo que i, luego estará en fase con i y estará representada por el vector OB:

$$OB = RI_{ef}.$$

Hemos visto que e' está defasada en atraso sobre i de $\frac{T}{4}$ ó 90°, luego estará representada por el vector OC perpendicular a OB y de longitud:

$$OC = E'_{ef}, \quad OC = 2\pi N \mathcal{L} I_{ef}.$$

La función $-e'$ estará representada por el vector OD, igual y opuesto a OC. La d. d. p. u está repre-

sentada por el vector OE, diagonal del paralelogramo construído sobre OB y OD, y la longitud OE mide el valor eficaz de esta d. d. p. Ahora bien, en el triángulo rectángulo OBE, se tiene:

$$OE^2 = OB^2 + BE^2;$$
$$OB = RI_{ef} \qquad BE = OC = 2\pi N\mathcal{L}I_{ef},$$

luego:

$$U_{ef}^2 = R^2 I_{ef}^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2 I_{ef}^2,$$
$$U_{ef}^2 = I_{ef}^2 (R^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2),$$

de donde:

(1) $$I_{ef} = \frac{U_{ef}}{\sqrt{R^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}}.$$

Comparando esta fórmula con la que expresa la ley de Ohm:

$$I = \frac{E}{R},$$

se ve que todo ocurre como si la resistencia óhmica R hubiera aumentado y se hubiera hecho igual a $\sqrt{R^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}$.

La cantidad $2\pi N\mathcal{L}$ se llama *reactancia* del circuito y la cantidad $\sqrt{R^2 + 4\pi N^2 \mathcal{L}^2}$ recibe el nombre de *impedancia* del circuito.

Además, la d. d. p. está defasada en adelanto sobre la corriente, o la corriente en atraso respecto a la d. d. p., de un ángulo φ, dado por la relación:

$$BE = OB \operatorname{tg} \varphi \text{ (pág. 374)},$$
$$2\pi N\mathcal{L}I_{ef} = RI_{ef} \operatorname{tg} \varphi,$$
$$2\pi N\mathcal{L} = R \operatorname{tg} \varphi,$$

(2) $$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi N\mathcal{L}}{R}.$$

Se ve que si el circuito no tiene auto-inducción, $\mathcal{L} = 0$, por consiguiente tg $\varphi = 0$, y $\varphi = 0$, es decir, que el defasaje de la corriente sobre la d. d. p. es nulo; la corriente está en concordancia de fase con la d. d. p., y sustituyendo $\mathcal{L}$ por 0 en la igualdad (1), se obtiene:

$$I_{ef} = \frac{U_{ef}}{R}.$$

Al contrario, si la resistencia óhmica es cero o al menos despreciable comparada con la auto-inducción, el denominador R de la expresión $\frac{2\pi N \mathcal{L}}{R}$ es infinitamente pequeño; luego tg φ es infinitamente grande, es decir, tg $\varphi = \infty$, y hemos visto (pág. 369) que cuando tg $\varphi = \infty$, $\varphi = 90°$; luego la corriente está defasada de 90°, o sea de un cuarto de período sobre la d. d. p.; sustituyendo R por cero en (1), se tiene:

$$I_{ef} = \frac{U_{ef}}{2\pi N \mathcal{L}}.$$

Por último, según la igualdad (2), tg φ y por consiguiente φ, es tanto menor cuanto mayor es R y menor es $\mathcal{L}$, luego el defasaje de la corriente sobre la d. d. p. es tanto menor cuanto mayor es la resistencia óhmica y cuanto menor es el coeficiente de auto-inducción.

Carrete de reactancia. — De aquí se deduce que en el caso de corrientes alternas, se puede emplear un carrete con auto-inducción variable para actuar sobre la intensidad de una corriente, del mismo modo que se emplea el reostato para la corriente continua.

Para conseguirlo, se pone en serie en el circuito un carrete arrollado sobre otro carrete hueco. En el interior de este último se hace entrar un núcleo formado por láminas delgadas de hierro aisladas unas de otras

y remachadas entre sí. Introduciendo más o menos este núcleo en el carrete, se aumenta o se disminuye la auto-inducción y por consiguiente se disminuye o se aumenta la corriente para una d. d. p. dada aplicada en los bornes (fig. 306).

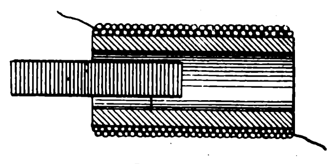


Fig. 306.

El circuito tiene capacidad. — *Condensador.* — Se llama condensador al sistema formado por dos conductores separados por un aislador; por ejemplo, dos láminas metálicas separadas por una capa de aire (figura 307), o dos cables concéntricos aislados uno de otro (fig 308). Las dos láminas o las dos almas de los cables *A* y *B* se llaman *armaduras* del condensador.

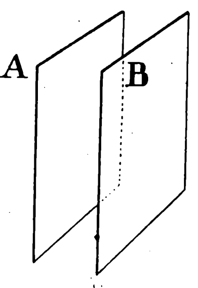


Fig. 307.

Unamos las armaduras *A* y *B* de un condensador a los dos polos de un generador de corriente continua, de una pila, por ejemplo, intercalando dos galvanómetros *G*, *G'* y un interruptor *I* (fig. 309). En el momento en que se cierra el interruptor, se observa que los conductores *SA* y *SB* son recorridos por una corriente dirigida, en el primero, de *S* hacia *A*, y en el segundo, de *B* hacia *S*, y que esta corriente es de cortísima duración; se llama corriente de carga.

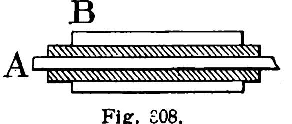


Fig. 308.

Después no pasa ninguna corriente por los conductores y el condensador obra como un aislador.

Entonces existe entre las armaduras una d. d. p. igual a la del generador de corriente, y dichas armadu-

ras están cargadas de cantidades iguales de electricidad, pero de signos contrarios; la cantidad que hay en cada una de las armaduras es la *carga* del condensador.

La experiencia nos dice que esta carga, para un mismo condensador, es proporcional a la d. d. p. aplicada entre las armaduras. Se puede, pues, escribir:

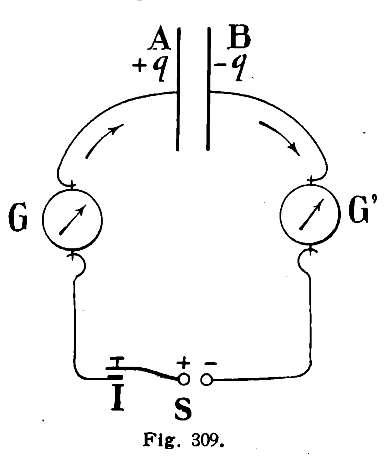


Fig. 309.

$$q = C \times u;$$

siendo q la carga, u la d. d. p. y C una constante que depende de la naturaleza del condensador. Esta constante es la *capacidad* del condensador.

Si la carga q está expresada en coulombs y la diferencia de potencial en volts, la capacidad dada por la relación

$$C = \frac{q}{u}$$

está expresada en una unidad que se le ha dado el nombre de *farad*.

Si después de haber cargado el condensador, se unen sus armaduras por una resistencia, pasa una corriente de muy poca duración por el conductor; se dice que el condensador se *descarga* en la resistencia. La cantidad que aparece en la descarga es igual a la cantidad Cu absorbida en la carga.

Apliquemos entre las armaduras una diferencia de potencial alterna de frecuencia N, de valor má-

ximo U_{max} y representada por la sinusoide $OABCD$ (figura 310).

Cuando la diferencia de potencial crece de 0 a U_{max}, la carga tomada por el condensador aumenta

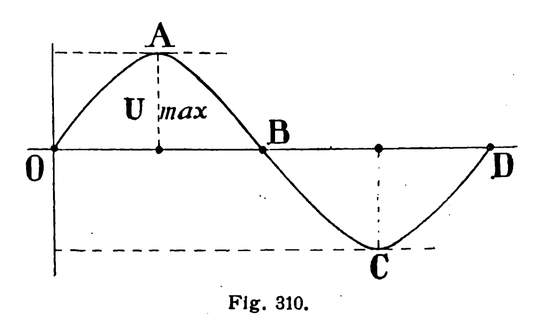
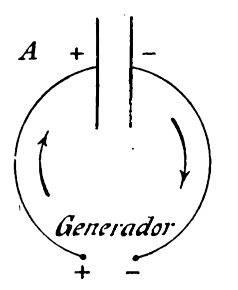
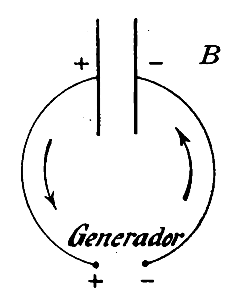


Fig. 310.

desde 0 hasta CU_{max}; es evidente que resulta una corriente que recorre el conductor del polo + hacia el polo — del generador y por consiguiente que es del mismo signo que la d. d. p. (fig. 311, *A*).



Sentido de la corriente cuando la d. d. p. aumenta.



Sentido de la corriente cuando la d. d. p. disminuye.

Fig. 311.

Cuando la d. d. p. decrece de U_{max} a 0, la carga del condensador disminuye desde $C\,U_{max}$ hasta 0; el condensador se descarga y resulta una corriente de sentido contrario a la anterior (fig. 311, *B*). Evidente-

mente, durante este segundo cuarto de período la polaridad del generador es la misma que durante el primero, y por consiguiente la corriente es de signo contrario a la anterior, es decir, de signo contrario a la diferencia de potencial.

Sea u el valor de la d. d. p. para un cierto tiempo t: en este momento la carga del condensador tiene un valor:

$$q = C \times u.$$

Consideremos un intervalo de tiempo t' muy pequeño después del instante t; durante este tiempo, la diferencia de potencial ha variado de un cierto valor u' y se ha hecho igual a $u + u'$: la nueva carga es entonces:

$$q' = C\,(u + u').$$

Luego durante el tiempo t' ha pasado por el conductor una cantidad de electricidad igual a:

$$q' - q = C \times (u + u') - Cu = Cu'.$$

Esta cantidad Cu' ha pasado por los conductores durante el tiempo t'; durante la unidad de tiempo pasará una cantidad $\frac{Cu'}{t'}$, que es, por definición, la intensidad de la corriente en el instante t, es decir:

$$(1) \qquad i = C \times \frac{u'}{t'}.$$

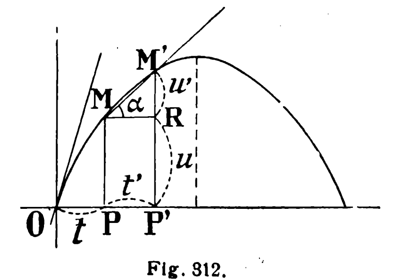


Fig. 312.

Representemos estas magnitudes sobre la curva que figura las variaciones de la diferencia de potencial aplicada entre las armaduras: sea $OP = t$, y se tendrá

$MP = u$; sea $PP' = t'$ y por lo tanto $OP' = t + t'$, luego $M'P' = u + u'$ y $M'R = u'$ (fig. 312).

En el triángulo rectángulo $MM'R$, se tiene:

$$M'R = MR \text{ tg } \alpha,$$

o sea:

$$u' = t' \text{ tg } \alpha,$$

de donde:

$$\text{tg } \alpha = \frac{u'}{t'},$$

y por consiguiente, según la igualdad (1),

$$i = C \times \text{tg } \alpha.$$

El valor de $\frac{M'R}{MR} = \text{tg } \alpha$ es lo que se llama la pendiente de la recta MM'. Como hemos supuesto t' muy pequeño, M' está muy cerca de M, y la recta $M'M$ se confunde con la tangente en M a la curva. Luego la corriente en el conductor es en cada instante igual al producto de la capacidad del condensador por la pendiente de la tangente a la curva en el punto correspondiente al tiempo t considerado (fig. 313).

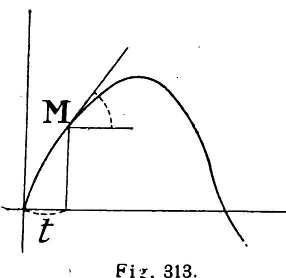


Fig. 313.

Se ve que esta pendiente es nula en el punto correspondiente al tiempo $\frac{T}{4}$ para el cual la d. d. p. es U_{max}, y es máxima en los puntos correspondientes a los tiempos 0 y $\frac{T}{2}$, para los cuales la diferencia de potencial es nula (fig. 314).

De aquí se deducen las siguientes consecuencias:

1.ª Cuando la d. d. p. aumenta, la corriente tiene el mismo signo que esta d. d. p.; y es de signo contrario cuando la d. d. p. disminuye:

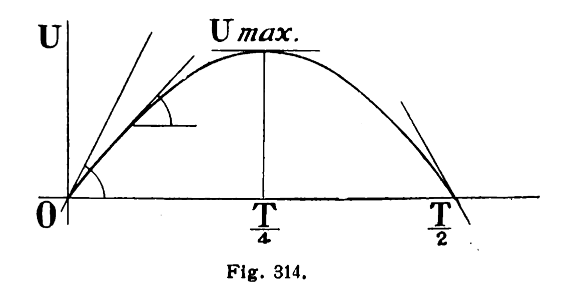


Fig. 314.

2.ª La corriente es nula cuando la d. d. p. es máxima, y máxima cuando la d. d. p. es nula.

Luego la curva representativa de la corriente será de la forma $A'B'C'D'$ (fig. 315), que se demuestra que

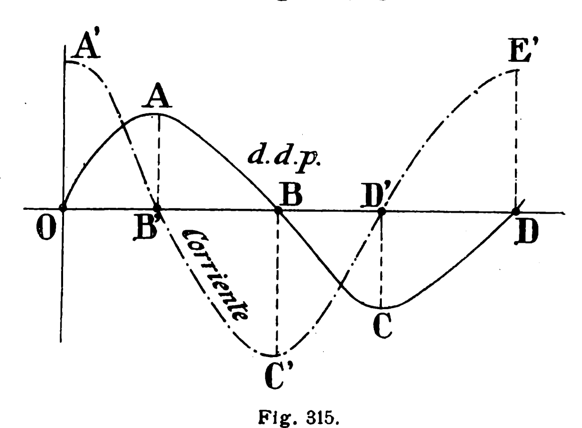


Fig. 315.

es una sinusoide. El examen de las dos curvas que representan la d. d. p. y la corriente nos indica que la corriente está defasada de un cuarto de período en adelanto sobre la d. d. p.

Valor eficaz de la corriente. — Durante un cuarto de período $\frac{T}{4}$, la carga del condensador pasa del valor 0 al valor CU_{max}; luego por el conductor pasa la cantidad CU_{max} durante el tiempo $\frac{T}{4}$, es decir, que el valor medio de la corriente es:

$$I_{med} = \frac{CU_{max}}{\frac{T}{4}},$$

$$I_{med} = \frac{4\,CU_{max}}{T}, \qquad I_{med} = 4\,NCU_{max},$$

y como

$$I_{max} = I_{med} \times \frac{\pi}{2},$$

se tiene:

$$I_{max} = 4\,NCU_{max} \times \frac{\pi}{2},$$

o bien:

$$I_{max} = 2\,\pi\,NCU_{max},$$

e

$$I_{ef} = \frac{2\,\pi\,NCU_{max}}{\sqrt{2}};$$

ahora bien:

$$\frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = U_{ef},$$

luego:

$$I_{ef} = 2\,\pi\,NCU_{ef},$$

o sea:

$$I_{ef} = \frac{U_{ef}}{\frac{1}{2\,\pi\,NC}}.$$

La cantidad $\frac{1}{2\pi NC}$ se llama la *capacitancia* del circuito.

De la expresión de I_{ef} se deduce:

$$U_{ef} = \frac{I_{ef}}{2\pi NC}.$$

Consideremos ahora un circuito formado por un condensador de capacidad C y por una resistencia R. Sea u la d. d. p. entre los extremos de este circuito, al cabo del tiempo t. En este instante, sea u_2 la d. d. p. entre los bornes del condensador, y u_1 la d. d. p. entre los bornes de la resistencia (fig. 316). Entre los valores instantáneos se tiene la relación:

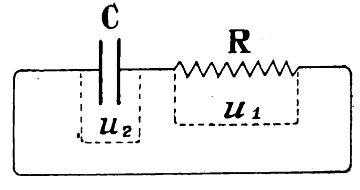


Fig. 316.

$$u = u_1 + u_2.$$

Luego la d. d. p. aplicada a los extremos del circuito está representada por la diagonal del paralelogramo construído sobre los vectores que representan u_1 y u_2.

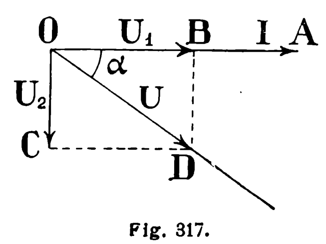


Fig. 317.

Tomemos por origen de fases la fase de la corriente, y sea OA el vector que la representa (fig. 317).

La d. d. p. $u_1 = Ri$ está en fase con esta corriente y estará representada por un vector confundido con OA; sea OB la longitud que mide su valor eficaz.

u_2 está defasada respecto a i de 90° en atraso; sea OC la longitud que mide su valor eficaz.

u está representada por la diagonal OD del paralelogramo construído sobre OB y OC, y la longitud OD mide el valor eficaz de la d. d. p. aplicada en los extremos del circuito:

Se ve, pues, que:

1.° La corriente está defasada en adelanto sobre u de un cierto ángulo α. En el triángulo OBD se tiene:

$$BD = OB \operatorname{tg} \alpha, \qquad \text{o sea} \qquad U_{2ef} = U_{1ef} \times \operatorname{tg} \alpha,$$

de donde:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U_{2ef}}{U_{1ef}}.$$

Ahora bien, sabemos que:

$$U_{1ef} = RI_{ef},$$

por no haber auto-inducción en el conductor R (página 401), y que

$$U_{2ef} = \frac{I_{ef}}{2\pi NC};$$

luego:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I_{ef}}{2\pi NC \times RI_{ef}} = \frac{1}{2\pi NCR}.$$

2.° En el mismo triángulo OBD se tiene:

$$OD^2 = OB^2 + BD^2,$$

o sea:

$$U_{ef}^2 = R^2 I_{ef}^2 + \frac{I_{ef}^2}{4\pi^2 N^2 C^2},$$

o bien:

$$U_{ef}^2 = I_{ef}^2 \left(R^2 + \frac{1}{4\pi^2 N^2 C^2}\right),$$

$$U_{ef} = I_{ef} \sqrt{R^2 + \frac{1}{4\pi^2 N^2 C^2}},$$

de donde:

$$I_{ef} = \frac{U_{ef}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{4\pi^2 N^2 C^2}}}.$$

La cantidad $\sqrt{R^2 + \frac{1}{4\pi^2 N^2 C^2}}$ es la *impedancia* del circuito.

Los resultados anteriores se resumen en el cuadro siguiente:

1.° El circuito tiene una resistencia óhmica R, y no tiene auto-inducción ni capacidad.	La corriente está en *fase* con la d. d. p. (fig. 318): $I_{ef} = \frac{U_{ef}}{R}$ Fig. 318.
2.° El circuito tiene una resistencia óhmica despreciable, un coeficiente de auto-inducción $\mathcal{L}$, pero sin capacidad.	La corriente está defasada de un cuarto de período o de 90° en *atraso* sobre la d. d. p. (fig. 319): $I_{ef} = \frac{U_{ef}}{2\pi N \mathcal{L}}$. $2\pi N\mathcal{L}$ es la *reactancia del circuito*. Fig. 319.
3.° El circuito tiene una resistencia óhmica R, un coeficiente de auto-inducción $\mathcal{L}$, pero sin capacidad.	La corriente está defasada en *atraso*, sobre la d. d. p., de un ángulo α dado por: $\operatorname{tg} \alpha = \frac{2\pi N \mathcal{L}}{R}$ (fig. 320); $I_{ef} = \frac{U_{ef}}{\sqrt{R^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}}$. Fig. 320. $\sqrt{R^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}$ es la *impedancia* del circuito.

4.° El circuito tiene una capacidad C, pero sin resistencia óhmica y sin auto-inducción.

La corriente está defasada de un cuarto de período o de 90° en *adelanto* sobre la d. d. p. (fig. 321):

$$I_{ef} = \frac{U_{ef}}{\dfrac{1}{2\pi NC}}.$$

Fig. 321.

$\dfrac{1}{2\pi NC}$ es la *capacitancia* del circuito.

5.° El circuito tiene una resistencia óhmica R, una capacidad C, pero sin auto-inducción.

La corriente está defasada en *adelanto*, sobre la d. d. p., de un ángulo α tal que $\operatorname{tg} \alpha = 2\pi NCR$ (figura 322):

$$I_{ef} = \frac{U_{ef}}{\sqrt{R^2 + \dfrac{1}{4\pi^2 N^2 C^2}}}.$$

Fig. 322.

$\sqrt{R^2 + \dfrac{1}{4\pi^2 N^2 C^2}}$ es la *impedancia* del circuito.

Observación. — La cantidad $2\pi N$ recibe el nombre de *pulsación* de la corriente y se representa por la letra ω.

Ejemplo.—Un circuito está compuesto de un conductor que tiene una resistencia de 10 ohms y un coeficiente de auto-inducción de 0,1 henry, y de un condensador de capacidad de 5 microfarads, en derivación

con el primer conductor (fig. 323). Se aplica en los extremos de este circuito una d. d. p. alterna de frecuencia igual a 50 y de valor eficaz igual a 110 volts.

Se quiere determinar: 1.°, el valor eficaz de la corriente en el primer conductor; 2.°, el valor eficaz de

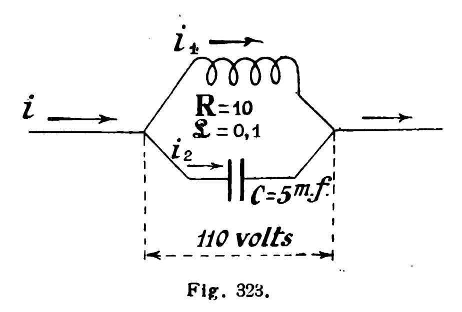


Fig. 323.

la corriente en el condensador; 3.°, el valor eficaz de la corriente total; 4.°, el defasaje de esta última corriente sobre la d. d. p. aplicada.

1.° *Corriente en el conductor:*

$$\text{frecuencia: } N = 50,$$

$$\text{pulsación: } 2\pi N = 2 \times 3{,}14 \times 50 = 314,$$

$$\text{reactancia: } 2\pi N\mathcal{L} = 314 \times 0{,}1 = 31{,}4,$$

$$\text{impedancia: } \sqrt{R^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2} = \sqrt{10^2 + 31{,}4^2} = 32{,}95,$$

corriente eficaz:

$$I_1 = \frac{u}{\sqrt{R^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}} = \frac{110}{32{,}95} = 3{,}33 \text{ amperes;}$$

defasaje φ de esta corriente sobre la d. d. p. aplicada:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi N\mathcal{L}}{R} = \frac{31{,}4}{10} = 3{,}14.$$

Esta corriente está defasada en ~~adelanto~~ atraso sobre la d. d. p.

Valores de sen φ y cos φ.

Hemos visto (págs. 372 y 373) que:

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\varphi}} \quad \text{y} \quad \operatorname{sen}\varphi = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\varphi}},$$

luego:

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+3{,}14^2}} = \frac{1}{3{,}295} = 0{,}30,$$

$$\operatorname{sen}\varphi = \frac{3{,}14}{\sqrt{1+3{,}14^2}} = \frac{3{,}14}{3{,}295} = 0{,}95.$$

2.° *Corriente en el condensador:*

$$\text{capacidad: } C = 5 \text{ microfarads} = \frac{5}{10^6} \text{ farad;}$$

$$\text{capacitancia: } \frac{1}{2\pi NC} = \frac{1}{2\times 3{,}14\times 50\times \frac{5}{10^6}} = \frac{10^6}{314\times 5} = 636;$$

$$\text{corriente: } I_2 = \frac{u}{\frac{1}{2\pi NC}} = \frac{110}{636} = 0{,}17 \text{ ampere.}$$

Esta corriente está defasada de 90° en adelante sobre la d. d. p.

3.° *Corriente total.*—Sea i la corriente total en un instante cualquiera, e i_1, i_2 las corrientes en el conductor y en el condensador en el mismo instante; se tiene:

$$i = i_1 + i_2.$$

Representemos i_1 e i_2, para lo cual tomaremos por origen de fases la fase de la d. d. p., que representaremos por el vector OU (fig. 324).

La corriente i_1 está defasada en atraso sobre u de un ángulo φ cuyo seno y coseno hemos calculado: por consiguiente estará representada por el vector OA que forma con Ou el ángulo φ, y cuya longitud es:

$$OA = I_1 = 3{,}33.$$

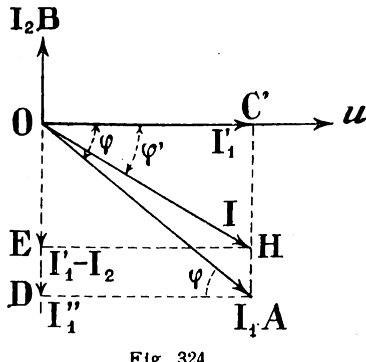


Fig. 324.

La corriente i_2 está defasada en adelanto sobre u de 90° y está representada por el vector OB, perpendicular a Ou y cuya longitud es $OB = I_2 = 0{,}17$.

Para hallar el valor de la resultante de i_1 e i_2, descompondremos i_1 en dos componentes dirigidas respectivamente según OC' y según la perpendicular a OC'. La primera componente tiene un valor eficaz medido por OC':

$$OC' = I'_1 = OA \cos\varphi,$$
$$I'_1 = I_1 \cos\varphi;$$

pero como

$$I_1 = 3{,}33 \quad \text{y} \quad \cos\varphi = 0{,}30,$$

se tiene:

$$I'_1 = 3{,}33 \times 0{,}30 = 0{,}99.$$

La segunda componente tiene un valor eficaz medido por OD:

$$OD = I''_1 = OA \operatorname{sen}\varphi,$$
$$I''_1 = I_1 \operatorname{sen}\varphi;$$

luego:

$$I''_1 = 3{,}33 \times 0{,}95 = 3{,}16.$$

Para determinar I, compondremos I'_1, I''_1 e I_2. La resultante de I''_1 e I_2 es $OE = I''_1 - I_2$, es decir:

$$OE = 3{,}16 - 0{,}17 = 2{,}99.$$

Componiendo I'_1 y OE se obtiene I, que es la longitud de la diagonal del paralelogramo construído sobre OC' y OE, o sea OH. En el triángulo OHC' se tiene:

$$OH^2 = OC'^2 + C'H^2,$$

o bien:

$$OH^2 = OC'^2 + OE^2;$$

luego:

$$I^2 = 0{,}99^2 + 2{,}99^2 = 9{,}92,$$
$$I = \sqrt{9{,}92} = 3{,}15 \text{ amperes}.$$

4.° *Defasaje de la corriente total sobre la d. d. p.* —Se ve que esta corriente está defasada en atraso sobre la d. d. p. de un ángulo φ; en el triángulo OHC' se tiene:

$$C'H = OC' \operatorname{tg} \varphi', \qquad \operatorname{tg} \varphi' = \frac{C'H}{OC'};$$

ahora bien:

$$C'H = OE = 2{,}99,$$
$$OC' = I'_1 = 0{,}99;$$

luego:

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{2{,}99}{0{,}99} = 3{,}02.$$

Potencia.—Sea un circuito de resistencia R, e i la corriente que lo recorre en un instante dado; sabemos que la potencia gastada en este circuito es, en el instante considerado Ri^2, valor esencialmente variable.

El valor medio de la potencia gastada en este circuito tendrá por valor la media de los valores Ri^2 durante un semiperíodo, y como R es constante, será:

$W = R \times$ media de los valores de i^2 durante un semiperíodo.

Ahora bien, por definición se tiene:

$I_{ef} = \sqrt{\text{valor medio de los valores de } i^2 \text{ durante un semiperíodo}}$,

luego:

$$W = R\, I_{ef}^2.$$

1.° *El circuito no tiene auto-inducción ni capacidad.*—Se sabe que en este caso:

$$I_{ef} = \frac{U_{ef}}{R}, \quad \text{o sea} \quad RI_{ef} = U_{ef}.$$

La potencia gastada en el circuito tiene por expresión:

$$W = RI_{ef}^2, \quad \text{o bien} \quad RI_{ef} \times I_{ef}.$$

Sustituyendo una vez I_{ef} por su valor anterior, se tiene:

$$W = U_{ef} \times I_{ef}.$$

2.° *El circuito tiene una resistencia R y un coeficiente de auto-inducción $\mathcal{L}$.*

En este caso sabemos que:

$$I_{ef} = \frac{U_{ef}}{\sqrt{R^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}};$$

luego sustituyendo en $W = RI_{ef}^2$ o en $W = RI_{ef} \times I_{ef}$, una vez I_{ef} por este valor tendremos:

$$W = R \times \frac{U_{ef}}{\sqrt{R^2 + 4\pi N^2 \mathcal{L}^2}} \times I_{ef},$$

o bien:

$$W = U_{ef}\, I_{ef} \frac{R}{\sqrt{R^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}}.$$

El factor $\frac{R}{\sqrt{R^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}}$ es evidentemente menor que 1 y recibe el nombre de *factor de potencia.*

La potencia gastada en el circuito es en este caso menor que el producto de la intensidad eficaz por el voltaje eficaz medido en los extremos de este circuito.

Se sabe que siendo φ el defasaje de la corriente sobre la fuerza electromotriz, se tiene:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi N \mathcal{L}}{R};$$

ahora bien, hemos visto (página 372) que:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}},$$

luego:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}{R}}}, \text{ o bien}$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{\frac{R^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}{R^2}}} = \frac{1}{\frac{\sqrt{R^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}}{R}},$$

o sea:

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}}.$$

Es decir, que el factor de potencia es igual a cos φ.

Para una misma corriente en el circuito y el mismo voltaje eficaz entre sus extremos, la potencia gastada

en este circuito es tanto menor cuanto mayor es el defasaje.

3.° *El circuito tiene una resistencia óhmica despreciable comparada con la auto-inducción.*— Se sabe que en este caso el defasaje de la corriente sobre la tensión es de 90°, o sea $\cos \varphi = 0$, luego la potencia utilizada en el circuito es nula.

4.° *El circuito tiene capacidad.* — Haciendo los mismos cálculos que en el caso de la auto-inducción, se vería que la potencia tiene por expresión:

$$W = U_{ef} \, I_{ef} \cos \varphi \quad \text{y} \quad \cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{4 \pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}}}$$

Por consiguiente, si una red alimenta un circuito de alumbrado y este circuito tiene muy poca auto-inducción, el factor de potencia difiere poco de 1 ($\cos 0 = 1$). Al contrario, si alimenta motores, la potencia, a igualdad de corriente y de fuerza electromotriz, será menor, porque los motores tienen auto-inducción (devanado sobre hierro) y producen un defasaje φ, y por lo tanto un factor de potencia $\cos \varphi < 1$. Por consiguiente, se ve fácilmente la importancia que tiene el procurar en cuanto sea posible la concordancia de fase entre la corriente y la tensión de manera que aumente el factor de potencia; se puede llegar a este resultado empleando una capacidad destinada a oponerse a los efectos de la auto-inducción, o empleando sobre la red motores sincrónicos sobreexcitados que, como veremos más adelante, juegan el mismo papel que las capacidades.

Componentes de una corriente. — Sea OA un vector que representa la d. d. p. u entre los extremos de un circuito ($OA = U_{ef}$) (fig. 325); sea φ el defasaje de la

corriente sobre la d. d. p.; la corriente estará representada por un vector OB cuya longitud mide I_{ef}.

Podemos descomponer OB según dos vectores OD y OH, uno paralelo y otro perpendicular a OA:

$$OD = OB \cos\varphi, \qquad OD = I_{ef} \cos\varphi;$$
$$OH = OB \operatorname{sen}\varphi, \qquad OH = I_{ef} \operatorname{sen}\varphi.$$

Es decir, que la corriente en el circuito puede considerarse como resultante de dos corrientes; una de ellas, de valor $I_1 = I_{ef} \cos\varphi$, en fase con la tensión, y la otra, cuyo valor eficaz es $I_2 = I_{ef} \operatorname{sen}\varphi$, que está en cuadratura con la tensión.

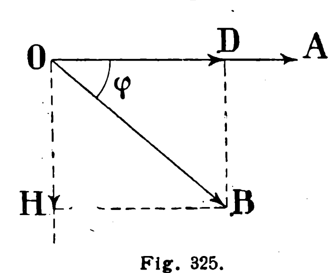


Fig. 325.

Ahora bien, la potencia utilizada en el circuito tiene por valor:

$$W = U_{ef} I_{ef} \cos\varphi,$$

y como $I_1 = I_{ef} \cos\varphi$, esta potencia tiene por valor:

$$W = U_{ef} I_1.$$

Esta componente I_1 recibe el nombre de *componente wattada* o *energética de la corriente*.

La segunda componente I_2, defasada de 90° sobre la tensión, da una potencia $U_{ef}\ I_{ef} \cos 90° = 0$, y se llama *componente dewattada, anergética* o *magnetizante de la corriente*.

Corrientes polifásicas.—Se llaman corrientes polifásicas a un conjunto de corrientes alternas de igual período que tienen entre sí una diferencia de fase de $\frac{2\pi}{n}$.

En la práctica sólo se producen corrientes bifásicas y corrientes trifásicas.

Corrientes bifásicas. — Un sistema bifásico está constituído por dos circuitos independientes uno de otro. $A_1\ B_1\ C_1\ D_1$ y $A_2\ B_2\ C_2\ D_2$ (fig. 326).

$A_1\ B_1$ y $A_2\ B_2$ son dos circuitos distintos de un generador construído de modo que en estos circuitos las fuerzas electromotrices tengan el mismo valor eficaz, el mismo período y defasadas entre sí de un cuarto de período, o sea de 90°; $C_1 D_1$ y $C_2 D_2$ son dos circuitos de utilización; $M_1 C_1$, $N_1 D_1$ y $M_2 C_2$, $N_2 D_2$ son conductores que unen los circuitos generadores con los circui-

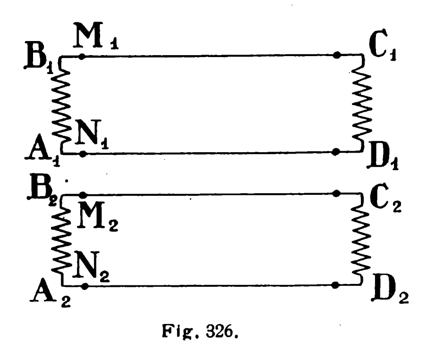


Fig. 326.

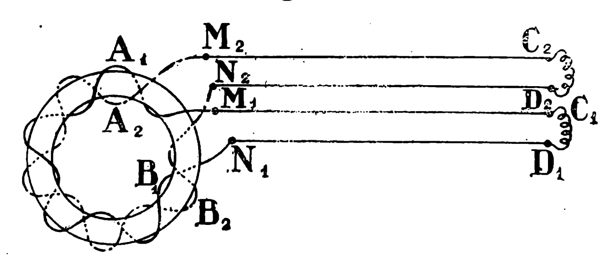


Fig. 327.

tos receptores (fig. 327). Si estos circuitos no tienen capacidad ni auto-inducción, los conductores son recorridos por corrientes en concordancia de fase con las diferencias de potencial entre los bornes, y por consiguiente defasadas una sobre otra de un cuarto de período.

Se ve que este sistema necesita cuatro conductores; en la práctica se reducen ordinariamente a tres, dando a los dos circuitos un conductor común. Este sistema está representado del modo siguiente (figuras 328 y 329).

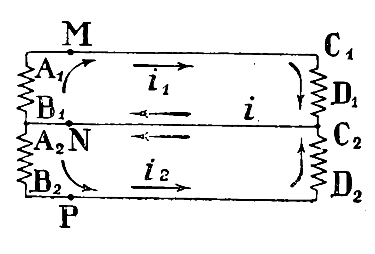


Fig. 328.

Si i_1 e i_2 son en un cierto instante los valores de las corrientes en los hilos de línea MC_1 y PD_2, la corriente en el hilo común será en ese instante: $i = i_1 + i_2$.

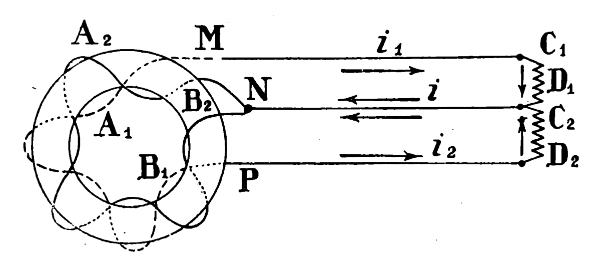


Fig. 329.

Para estudiar las propiedades de un sistema semejante, admitiremos, lo cual no se realiza ninguna vez rigurosamente, que las corrientes i_1 e i_2 están respectivamente en fase con las fuerzas electromotrices inducidas en los dos circuitos del generador. En realidad estas corrientes están defasadas respectivamente, una en adelanto, la otra en atraso sobre estas dos fuerzas electromotrices; pero estos defasajes son muy pequeños, y admitiendo que son nulos, podremos formarnos idea clara de las propiedades que queremos conocer.

Las fuerzas electromotrices inducidas en los circuitos generadores están representadas por dos vectores OA y OB que forman entre sí un ángulo de 90° y

que tienen una longitud proporcional a la fuerza electromotriz eficaz inducida en los dos circuitos generadores: $OA = OB$ (fig. 330).

Las corrientes i_1 e i_2 en los hilos de línea están representadas por dos vectores de direcciones OA y OB según las convenciones que hemos hecho, cuyas longitudes OM y ON son proporcionales al valor eficaz de estas corrientes. Supongamos que los dos circuitos son idénticos (figura 331). La corriente i' en el conductor común estará representada por la diagonal OP, por ser $i' = i_1 + i_2$, y la longitud de esta diagonal mide su valor eficaz. Por consiguiente, si I es el valor eficaz de la corriente en cada uno de los conductores extremos, I' el valor eficaz de la corriente en el conductor común, se tiene:

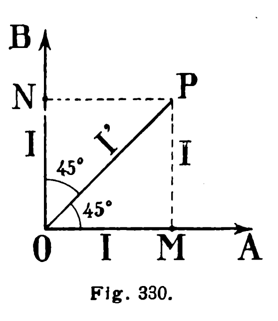


Fig. 330.

$$I'^2 = 2\,I^2,$$

o bien:

$$I' = I\sqrt{2}.$$

Además se ve que OP es bisectriz del ángulo MON; luego la corriente en el hilo común está defasada de 45° en adelanto sobre la corriente en uno de los hilos extremos y de 45° en atraso sobre la otra.

Por último, si u_1 es la diferencia de potencial instantánea entre los bornes M, N, y u_2 la diferencia de potencial en el mismo instante entre los bornes N y P, se tiene:

$$u = u_1 + u_2.$$

Siendo u la diferencia de potencial entre M y P en el mismo instante. Por consiguiente, si U es el valor

eficaz de las diferencias de potencial entre el conductor común y cada uno de los conductores extremos, y U' el valor eficaz de la d. d. p. entre los conductores extremos, se ve que, análogamente a la corriente,

$$U' = U\sqrt{2}.$$

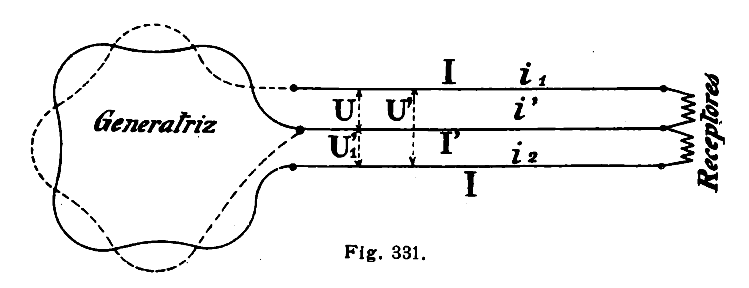


Fig. 331.

Sistema trifásico. — Un sistema trifásico está formado de tres circuitos independientes, de la siguiente manera:

A, *B* y *C* son tres devanados independientes, de un generador que mantiene en cada uno de ellos tres

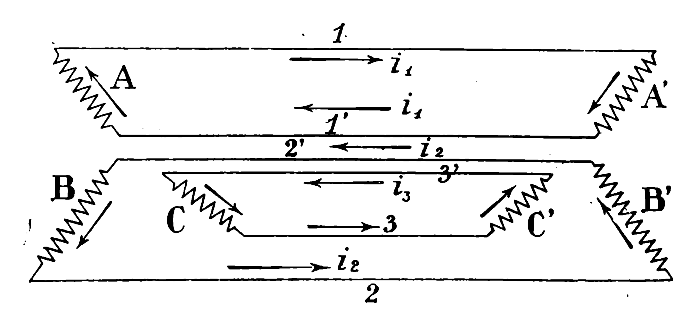


Fig. 332.

fuerzas electromotrices del mismo período, del mismo valor eficaz y defasadas una sobre otra de un tercio de período, o sea de 120°. Los extremos de estos tres deva-

nados están unidos por seis conductores 1, 1'; 2, 2'; 3, 3', a tres circuitos de utilización A', B', C' (figuras 332 y 333).

Si los tres circuitos son idénticos y no tienen capacidad ni auto-inducción, son recorridos por tres corrien-

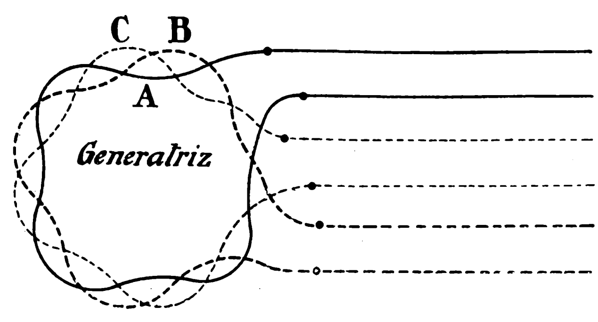


Fig. 333.

tes que tienen el mismo valor eficaz, el mismo período y defasadas de un tercio de período o de 120° una sobre otra y en concordancia de fase con las tres tensiones entre los extremos de los circuitos generadores.

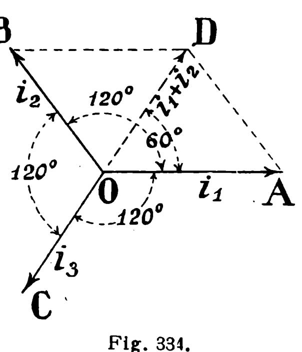


Fig. 334.

La suma de los valores instantáneos de estas tres corrientes es cero. En efecto, estas tres corrientes pueden representarse por tres vectores OA, OB, OC, formando entre sí ángulos de 120° y cuya longitud común es proporcional al valor eficaz común I de las tres corrientes (fig. 334).

La suma de las dos primeras corrientes $i_1 + i_2$ está representada por la diagonal OD del paralelogramo

construído sobre OA y OB, y la suma de las corrientes $i_1 + i_2 + i_3$ está representada por el vector que figura la suma geométrica de OC y OD.

Ahora bien, OD y OC son iguales y directamente opuestos; su suma geométrica es cero. La suma de las tres corrientes $i_1 + i_2 + i_3$ está representada por un vector de longitud cero, es decir, que el valor eficaz y por consiguiente el valor máximo de esta suma es nulo, luego se tiene en cada instante:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0.$$

Es fácil ver que $OD = OC$ y que OC está sobre la prolongación de OD.

En efecto, el triángulo AOD es equilátero, porque siendo $OADB$ un rombo, la recta OD es bisectriz del ángulo O y $AOD = 60°$; además, el triángulo AOD es isósceles, por ser $OA = AD$; luego los ángulos AOD y D son iguales, es decir, que cada uno vale 60°, por consiguiente el triángulo es equilátero, luego $OA = OD$ y por lo tanto $OC = OD$.

Por otra parte, $COA + AOD = 120 + 60 = 180°$, es decir, que OD es la prolongación de OC.

MONTAJE EN ESTRELLA.—Sean (1), (2) y (3) los tres circuitos de un generador trifásico, en los extremos de los cuales existen fuerzas electromotrices defasadas de un tercio de período; a_1, b_1; a_2, b_2; a_3, b_3 son los conductores que unen estos circuitos a tres circuitos de utilización (1′), (2′), (3′) (fig. 335).

Si se unen entre sí los tres conductores b_1, b_2, b_3, se obtiene un *montaje en estrella*. Los puntos o y o', comunes a los circuitos generadores y a los circuitos receptores, se llaman *centros* de las estrellas (fig. 336).

Se ve que la línea común oo' es recorrida por una corriente igual a la suma de las tres corrientes i_1, i_2 i_3 que circulan por cada una de las líneas a_1, a_2, a_3.

Si los tres circuitos receptores 1', 2', 3' son idénticos, las tres corrientes i_1, i_2, i_3 están defasadas de 120°

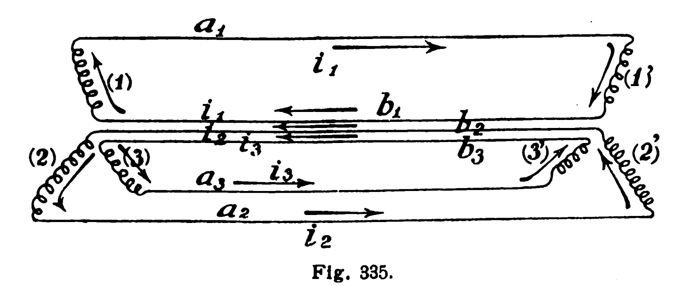


Fig. 335.

unas de otras, y su suma es en cada instante nula, no circulando corriente alguna por el conductor oo', que

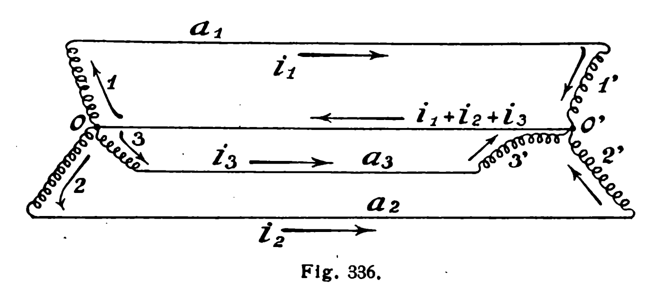


Fig. 336.

podrá por consiguiente suprimirse, teniéndose en este caso el montaje representado por la figura 337.

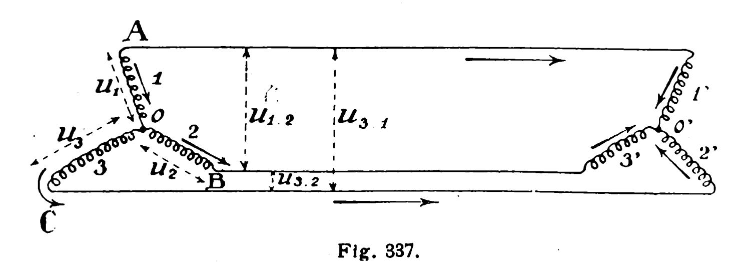


Fig. 337.

Propiedades. — Sea U la diferencia de potencial eficaz entre el centro de la estrella del generador y

cada uno de los bornes *A*, *B*, *C*; sean u_1, u_2 y u_3 los valores de estas d. d. p. en un instante *t*, y $u_{1 \cdot 2}$, $u_{2 \cdot 3}$, $u_{3 \cdot 1}$ los valores de las d. d. p. entre los extremos *A* y *B*, *B* y *C*, *C* y *A* en el mismo instante.

Entre estos valores instantáneos se tienen las relaciones:

$$u_{1 \cdot 2} = u_1 - u_2,$$
$$u_{2 \cdot 3} = u_2 - u_3,$$
$$u_{3 \cdot 1} = u_3 - u_1.$$

Siendo u_1, u_2, u_3 tres d. d. p. del mismo valor eficaz *U*, defasadas unas sobre otras de $\frac{1}{3}$ de período, estarán representadas por tres vectores *OM*, *ON* y *OP*,

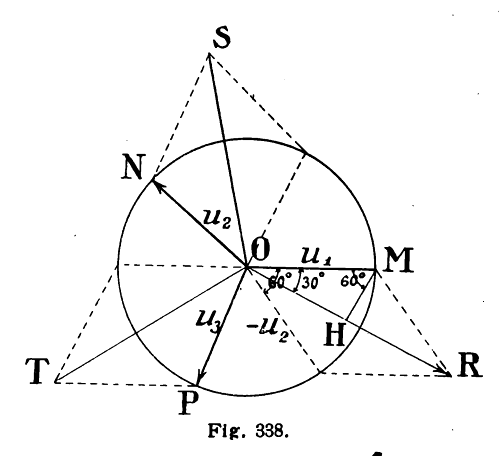


Fig. 338.

que forman entre sí ángulos de 120° teniendo todos la misma longitud, que expresa la medida de *U*. El valor eficaz del voltaje $u_{1\,2}$ entre los puntos *A* y *B* está medido por la diagonal del paralelogramo construído sobre u_1 y $-u_2$ (fig. 338); sea *OR* esta diagonal. Tracemos *MH*, perpendicular a *OR*. El triángulo *OMR* es isósceles, luego *MH* es una mediana, es decir, que

$$OR = 2\,OH.$$

Ahora bien:

$$OH = OM \text{ sen } 60^\circ$$

y

$$\text{sen } 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ (pág. 371);}$$

luego:

$$OH = U \text{ sen } 60^\circ = U \frac{\sqrt{3}}{2}$$

y

$$OR = U\sqrt{3}.$$

Análogamente:

$$OS = OT = U\sqrt{3}.$$

Por consiguiente: *La diferencia de potencial eficaz entre dos cualesquiera de los tres conductores, es igual a la diferencia de potencial eficaz entre el centro de la estrella del generador y cada uno de los tres bornes, multiplicada por $\sqrt{3}$.*

Si los circuitos de utilización 1′, 2′ y 3′ son idénticos y no tienen capacidad ni auto-inducción, las corrientes en las líneas están en concordancia de fase con las diferencias de potencial entre el centro de la estrella generatriz y los bornes correspondientes, y son iguales a las que circulan por los circuitos del generador.

MONTAJE EN TRIÁNGULO.—El montaje en triángulo está representado esquemáticamente en la figura 339.

En los circuitos 1, 2, 3 del generador existen f. e. m. alternas del mismo valor eficaz y defasadas de un tercio de período una sobre otra. Los dos extremos de cada uno de estos tres circuitos están unidos a los

extremos de los tres circuitos del receptor; es decir, que hay seis conductores.

Se pueden reducir los seis conductores a tres, uniéndolos dos a dos del modo indicado en la figura 340.

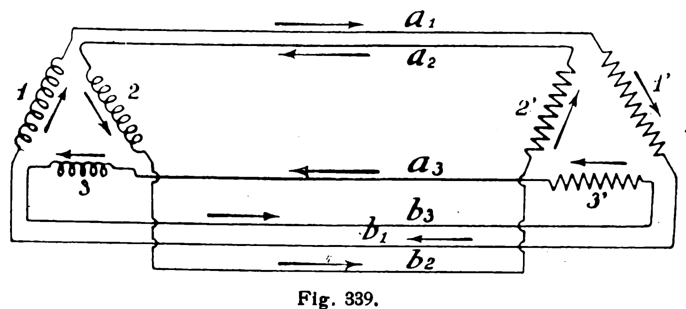


Fig. 339.

De los extremos A, B, C, comunes a los circuitos 1, 2; 2, 3; 3, 1, parten tres conductores que van a parar a los extremos de los tres circuitos de utilizacion 1', 2' y 3'.

Luego la d. d. p. entre las tres líneas es la misma que entre los extremos A, B y C, es decir, que entre los

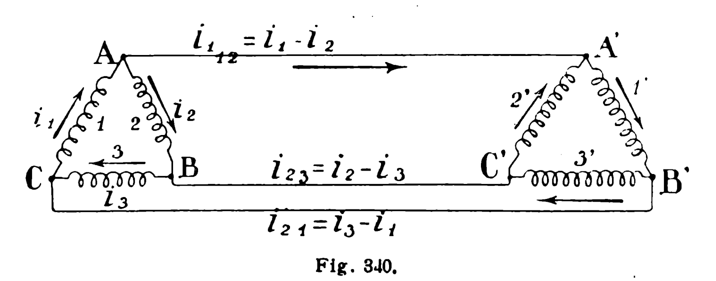


Fig. 340.

bornes del generador: sea U el valor eficaz común de estas d. d. p.

Sean i_1, i_2, i_3 los valores de las corrientes en un instante t en los circuitos 1, 2, 3. Designaremos por $i_{1 \cdot 2}$, $i_{2 \cdot 3}$, $i_{3 \cdot 1}$ las corrientes instantáneas en las

líneas que parten de los puntos A, B, C, comunes a los circuitos 1,2; 2,3; 3,1.

Entre estos valores instantáneos se tienen las relaciones:

$$i_{1\,.\,2} = i_1 - i_2,$$
$$i_{2\,.\,3} = i_2 - i_3,$$
$$i_{3\,.\,1} = i_3 - i_1;$$

de donde:

$$i_{1\,.\,2} + i_{2\,.\,3} + i_{3\,.\,1} = 0.$$

Las tres corrientes i_1, i_2, i_3 están defasadas de 120° unas sobre otras y tienen el mismo valor eficaz I, luego pueden representarse por los tres vectores OA, OB y OC (fig. 341).

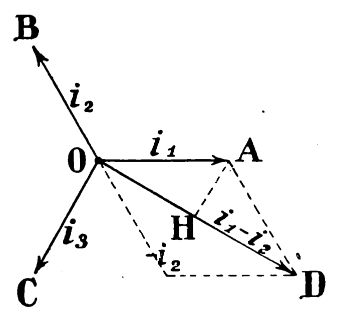


Fig. 341.

La corriente $i_{1.2} = i_1 - i_2$ estará representada por la diagonal del paralelogramo construído sobre i_1 y $-i_2$, es decir, OD; se demuestra del mismo modo que en el caso de la figura 338, que:

$$OD = OA\sqrt{3}.$$

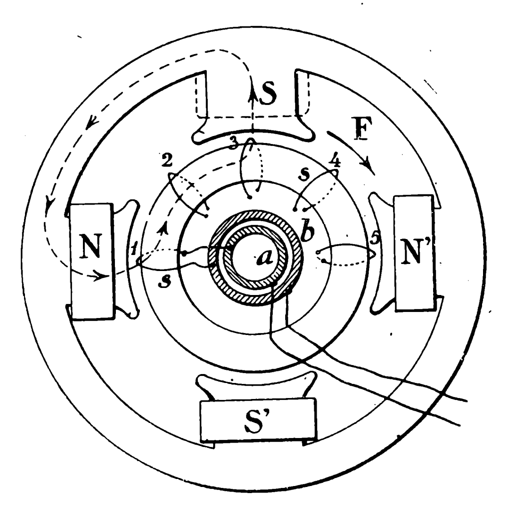
Luego: *La corriente eficaz en cada hilo de línea es igual a la corriente eficaz en cada uno de los circuitos del generador, multiplicada por* $\sqrt{3}$.

CAPÍTULO XVII

Alternadores

Los alternadores son máquinas electromagnéticas que pueden producir entre anillos o bornes unidos a los extremos de circuitos inducidos, fuerzas electromotrices alternas, y por consiguiente, en un circuito exterior que parta de estos bornes producirán corrientes alternas.

El estudio que hemos hecho de las máquinas de corriente continua acerca de los valores que toma la f. e. m. inducida en una espira que se mueve alrededor de una corona de polos magnéticos, nos permite formarnos idea de un alternador.



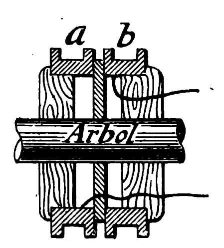


Fig. 342.

Supongamos una espira s que gira en el sentido de la flecha F, alrededor de la corona de cuatro polos N, S, N', S', y cuyos extremos están unidos a dos anillos aislados a, b, arrastrados por la espira en su movimiento de rotación (fig. 342).

Sabemos que cuando la espira se mueve pasando sucesivamente por las posiciones 1, 2, 3, 4, 5 y describiendo la circunferencia entera durante el tiempo T, la f. e. m. inducida en esta espira toma valores cuyas variaciones están indicadas en la tabla siguiente (véase página 288):

Posición de la espira	Tiempo	F. e. m. inducida
1	. . . 0 . . .	$+ E$ (máximo)
		decrece
2	. . . $\frac{T}{8}$ . . .	0
		decrece
3	. . . $\frac{T}{4}$ . . .	$- E$ (mínimo)
		crece
4	. . . $\frac{3T}{8}$ . . .	0
		crece
5	. . . $\frac{T}{2}$ . . .	$+ E$ (máximo)

Estas variaciones pueden representarse por la curva de la figura 343.

Por consiguiente, si por medio de dos frotadores que se apoyen sobre los anillos a, b, se recoge una corriente en un circuito exterior, esta corriente será alterna y aproximadamente sinusoidal. Se ve que el período de esta fuerza electromotriz y por lo tanto de la corriente que produce, es igual a la duración de una semivuelta: también se ve que si la espira se mueve alrededor de una corona de ocho polos, el período será igual a la duración de un cuarto de vuelta. En general, si N es el

número de vueltas por segundo y $2p$ es el número de polos, el período de la corriente producida es $\frac{1}{Np}$ y la frecuencia de esta corriente es Np.

Un alternador consta de un gran número de espiras que obran como la que acabamos de considerar y que están unidas entre sí de un modo conveniente.

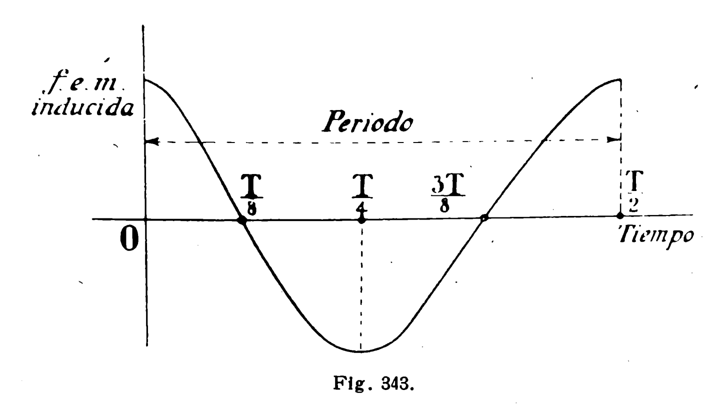


Fig. 343.

En un alternador monofásico, las espiras están unidas entre sí de modo que las fuerzas electromotrices inducidas en cada una de ellas se sumen en cada instante, es decir, que están agrupadas en serie. El conjunto de todas las espiras tiene dos extremos libres entre los cuales existe la tensión alterna, estando unidos a dos anillos aislados fijos sobre el árbol de la máquina.

En un alternador trifásico, hay tres grupos de espiras independientes unos de otros: todas las espiras de cada grupo están unidas entre sí de tal modo que siempre están en serie; y los tres grupos están dispuestos entre sí y respecto a los polos inductores de tal manera, que las tres fuerzas electromotrices producidas estén defasadas entre sí de un tercio de período.

Estos tres circuitos independientes pueden montarse en estrella o en triángulo.

Clasificación de los alternadores.—Los alternadores se dividen en dos grupos:

1.° Alternadores de flujo ondulado u homopolares;

2.° Alternadores de flujo alternado o heteropolares.

En los alternadores de flujo ondulado, el sistema inductor está constituído por un conjunto de piezas polares dispuestas alrededor de un mismo eje (fig. 344); la excitación se produce por un solo carrete *B* que rodea la parte central, de modo que todos los polos norte están situados a un mismo lado y todos los polos sur a otro.

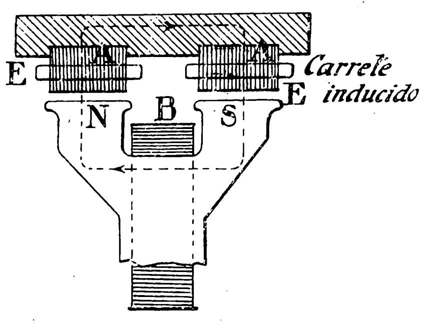


Fig. 344.

El circuito magnético se cierra a través de una armazón de fundición o de acero colado extradulce, en la que hay dos grandes anillos *A*, *A* formados de láminas delgadas de palastro aisladas entre sí, constituyendo el núcleo del inducido sobre el cual se disponen los devanados *E*, *E*. Este sistema necesita por consiguiente dos devanados distintos.

El flujo a través de las espiras inducidas tiene siempre el mismo sentido, y varía de un valor máximo a un valor mínimo; de aquí el nombre de alternador de flujo ondulado.

En los alternadores de flujo alternado, el sistema inductor está constituído por una serie de polos alternativamente norte y sur, frente a los cuales está dis-

puesto el devanado del inducido. El órgano móvil puede ser el inducido o el inductor. Si el inducido es móvil, la corriente se toma por medio de anillos sobre los cuales se apoyan las escobillas; en cambio, si el inductor es móvil, la corriente inducida se toma por los bornes y la corriente de excitación es facilitada al circuito inductor por medio de anillas.

Devanado de los alternadores. — 1.° *Alternador monofásico.*—Si el número de carretes inducidos es igual a la mitad del número de polos (esquema *A*) (fig. 345), se ve que, en cada instante, las f. e. m. inducidas en los carretes son todas iguales, del mismo sentido, y en fase; por consiguiente, para agruparlos en serie será preciso unir el extremo de cada uno con el principio del siguiente. Los dos extremos libres de la serie están unidos a dos anillos sobre los cuales frotan las escobillas.

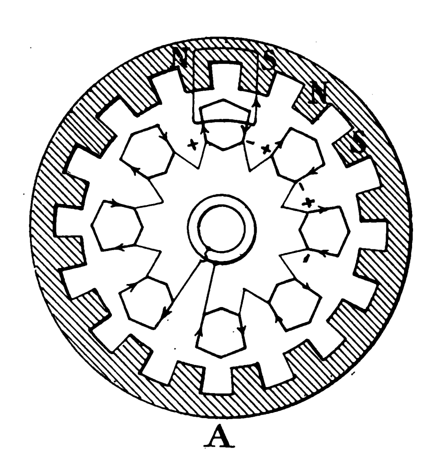


Fig. 345.

Si el número de carretes inducidos es igual al número de polos, en el momento en que uno de ellos pasa por delante de un polo norte, es decir, en el momento en que la f. e. m. inducida en este carrete pasa por su valor máximo, el siguiente se encuentra frente a un polo sur, y la f. e. m. inducida en este carrete pasa también por su valor máximo, pero es de sentido

contrario a la del primero. Luego habrá que unir el principio de cada carrete con el principio del siguiente (esquema *B*) (figura 346).

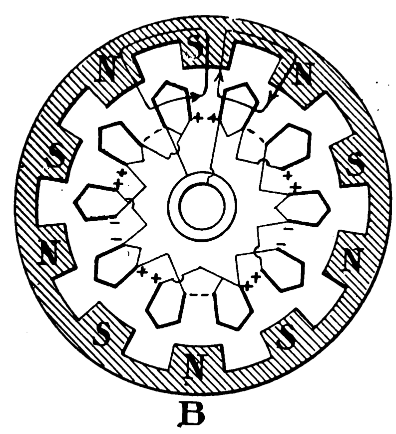


Fig. 346.

2.° *Alternadores polifásicos.*—El esquema *C* (fig. 347) representa los devanados de un alternador bifásico; los extremos de los dos devanados 1 y 2 están unidos cada uno a dos anillos; sobre estos cuatro anillos se apoyan cuatro escobillas. Se ve que en las espiras de 1 se producen f. e. m. que pasan en el mismo momento por cero y su máximo; lo mismo se verifica en las espiras de 2, luego las espiras de 1 y de 2 están para cada circuito en concordancia de fase, y montadas en serie.

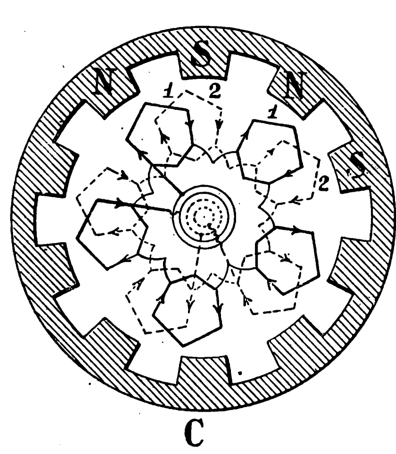


Fig. 347.

Las espiras de 2 están defasadas sobre las de 1 en un cuarto de la distancia que separa dos polos consecutivos del mismo nombre, de modo que las espiras de 2 pasan frente a un polo *N* o *S* y entre

dos polos, un cuarto de período después que las de 1.

Es evidente que la f. e. m. inducida en 2 pasa por su máximo y por cero un cuarto de período después que la inducida en 1 y, por consiguiente, estas dos f. e. m. están defasadas en un cuarto de período.

El esquema *D* (fig. 348) representa los devanados de un alternador trifásico en estrella; uno de los extremos de las fases 1, 2, 3 está unido a un mismo anillo *O*

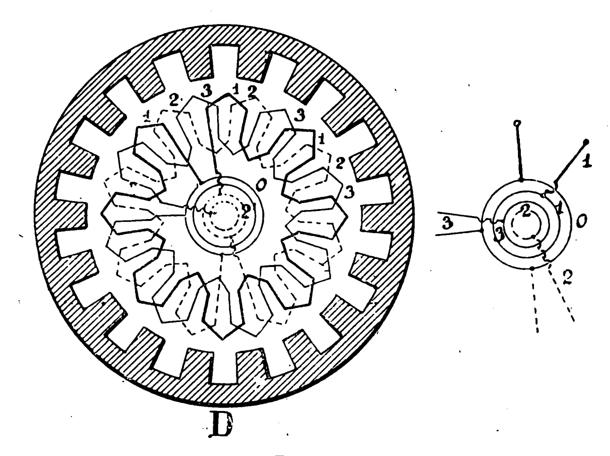


Fig. 348.

y los otros a tres anillos 1, 2, 3 sobre los cuales se apoyan tres escobillas. El anillo *O* es el centro de la estrella.

Las distancias entre las espiras de 1 y de 2, de 2 y de 3 son iguales al tercio de la distancia entre dos polos consecutivos del mismo nombre, de modo que las espiras de 2 pasan frente a un polo *N* o *S* y entre dos polos, un tercio de período después que las de 1; y las de 3, un tercio de período después que las de 2. Las f. e. m. inducidas en cada uno de los tres devanados están defasadas entre sí en un tercio de período.

Elección de montaje en una instalación receptora trifásica.—En el caso más general sólo se emplean tres conductores: el montaje en triángulo se impone cuando la utilización está constituída por circuitos de alumbrado.

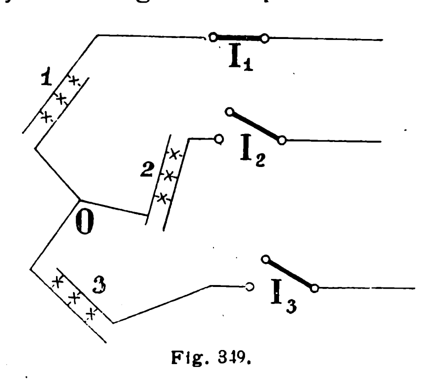


Fig. 349.

En efecto, si se empleara el montaje en estrella, se sabe que no podría funcionar uno solo de los circuitos (figura 349); además, si se utilizaran solamente dos circuitos, el voltaje en los bornes de los otros dos quedaría modificado considerablemente.

Supongamos, por ejemplo, que se tienen lámparas construídas para 110 volts, y que funcionando normalmente, es decir, cargadas igualmente las tres fases, se tengan 110 volts entre el centro de la estrella receptora y cada una de las líneas (fig. 350).

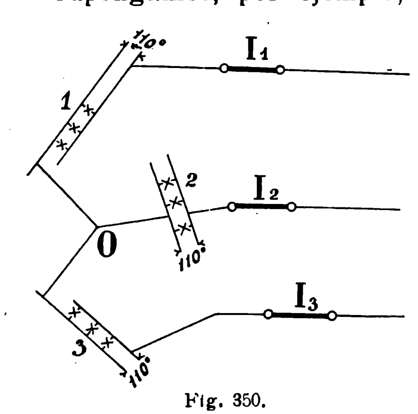


Fig. 350.

Suprimamos un grupo de lámparas, el grupo 3, por ejemplo (fig. 351); los otros dos estarán montados en serie bajo $110\sqrt{3}$ volts, o sea bajo

$$110 \times 1{,}732 = 190 \text{ volts,}$$

y las lámparas estarán sometidas a la tensión.

$$\frac{190}{2} = 95 \text{ volts,}$$

en vez de funcionar bajo 110 volts.

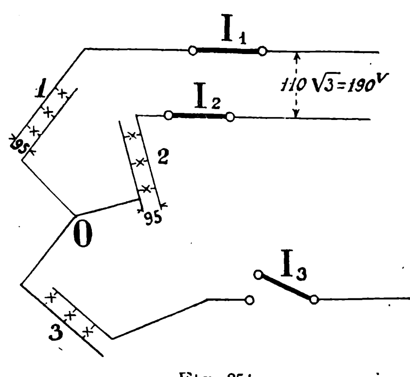


Fig. 351.

En general, si los tres circuitos receptores no son idénticos, por ejemplo, si el número de lámparas por circuito no es el mismo, uno de los grupos, el más resistente, que sería el que tuviera menos lámparas, estará sometido a un voltaje excesivo y los otros estarán bajo un potencial demasiado pequeño.

Al contrario, si se utiliza el montaje en triángulo (figura 352), cada lámpara o grupo de lámparas puede funcionar independientemente de los otros dos grupos; si se producen diferencias de carga en las fases, las variaciones de voltaje en los bornes de las lámparas serán insignificantes.

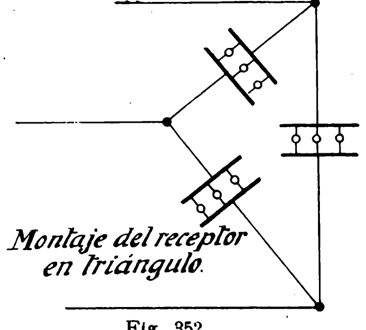


Fig. 352.

Se emplea con mucha frecuencia el montaje mixto: en estrella para los generadores y en triángulo para los receptores (fig. 353).

Potencia de un alternador.—Sean u e i los valores instantáneos de la d. d. p. y de la coriente que produce un alternador; la potencia en el instante considerado es $u\ i$ watts. Este valor $u\ i$ es una magni-

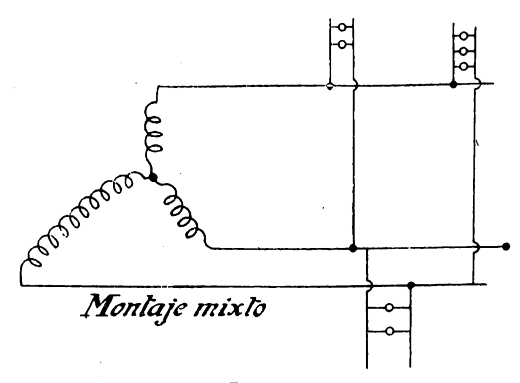


Fig. 353.

tud algebraica susceptible de signo; si u e i son del mismo signo, la potencia es positiva; en cambio, es negativa si u e i son de signos contrarios, y en este

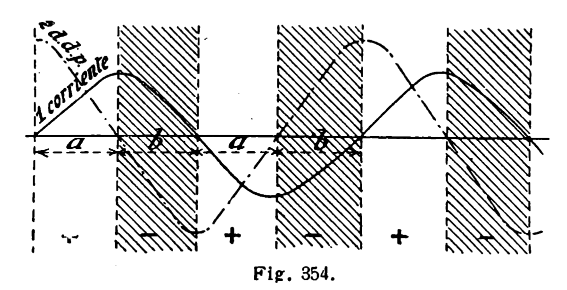


Fig. 354.

caso el alternador recibe energía de la red a que está unido.

Consideremos los tres casos siguientes:

PRIMER CASO. — *La corriente está defasada de un cuarto de período sobre la d. d. p.*—Las dos magnitu-

des, corriente y d. d. p., están representadas por las sinusoides (1) y (2) (fig. 354).

Se ve que durante los intervalos de tiempo *a*, la d. d. p. y la corriente son del mismo signo; la potencia es positiva, es decir, que el alternador transmite potencia al circuito exterior. Durante los intervalos *b*, la d. d. p. y la corriente son de signos contrarios; la potencia es negativa, y en este caso el circuito exterior devuelve al alternador la potencia que antes había recibido.

Las dos sinusoides están defasadas de un cuarto de período, $a = b$, y la potencia recibida por la red es devuelta íntegramente al alternador; por consiguiente, la potencia media producida por el alternador es *cero*.

Segundo caso. — *La corriente está defasada de menos de un cuarto de período sobre la d. d. p.* — La

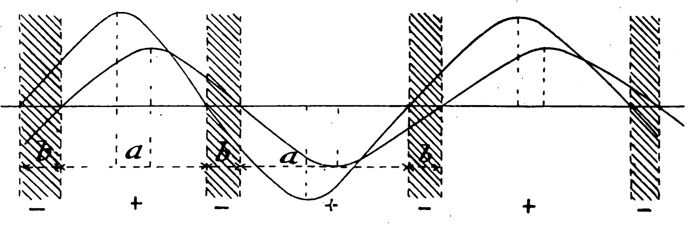


Fig. 355.

corriente y la d. d. p. están representadas por las sinusoides de la figura 355.

Se ve que los intervalos de tiempo *a* durante los cuales la potencia es positiva, son mayores que los intervalos *b* durante los cuales la potencia es negativa.

El alternador produce una cierta potencia *media* en el circuito exterior.

Tercer caso.—*La corriente está defasada en más de un cuarto de período sobre la d. d. p.*—La corriente y la d. d. p. están representadas por las dos sinusoides

de la figura 356. Los intervalos *a* son menores que los intervalos *b*; la potencia recibida es superior en este caso a la potencia producida por el alternador; es decir, que funciona como motor.

Por consiguiente, para que un alternador obre como generador, es necesario que el defasaje de su corriente sobre la d. d. p. sea inferior a un cuarto de período. Si es superior, obra como motor.

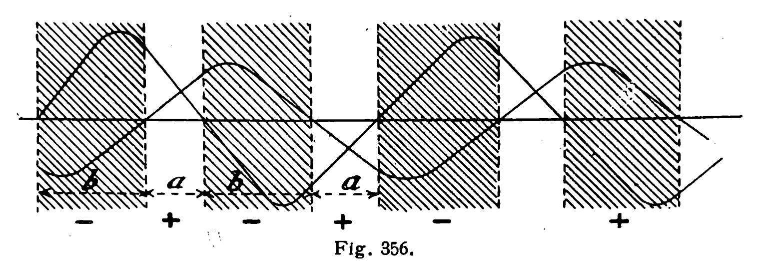


Fig. 356.

Se ha demostrado que el valor medio de la potencia proporcionada por una máquina que produce una corriente eficaz I bajo una diferencia de potencial eficaz U, siendo el defasaje φ, es:

$$W = UI \cos \varphi.$$

Se ve, según hemos estudiado en los tres casos anteriores, que:

Si $\varphi < \frac{\pi}{2}$, la potencia W es positiva;

Si $\varphi = \frac{\pi}{2}$, la potencia es cero;

Si $\varphi > \frac{\pi}{2}$, la potencia es negativa.

Potencia producida por un alternador bifásico. — Sea U el valor eficaz de la diferencia de potencial entre cada uno de los conductores extremos y el conductor común. Si los circuitos receptores son idénti-

cos, recorridos por corrientes del mismo valor eficaz I, y si φ es el defasaje producido por cada circuito, la potencia producida en cada uno de éstos es $UI \cos \varphi$, y la potencia total producida por el generador es $2\ UI \cos \varphi$.

Potencia producida por un alternador trifásico.— 1.° *Montaje en estrella.* — Sea U' la diferencia de potencial entre el centro de la estrella y cada uno de los conductores de la línea; I el valor eficaz de la corriente en cada línea; φ el defasaje producido por cada una de las fases idénticas, que supondremos igualmente cargadas. La potencia producida por cada fase es $U' I \cos \varphi$ y la potencia total:

$$W = 3\ U'I \cos \varphi.$$

Ahora bien, hemos visto que si U es el voltaje eficaz medido entre los tres conductores, se tiene:

$$U = U' \sqrt{3}, \quad \text{de donde:} \quad U' = \frac{U}{\sqrt{3}};$$

luego:

$$W = 3\ \frac{UI}{\sqrt{3}} \cos \varphi = UI \sqrt{3} \cos \varphi.$$

2.° *Montaje en triángulo.* — Las tres fases son idénticas e idénticamente cargadas; si U es el voltaje eficaz entre los hilos de línea, I' la corriente en cada uno de los circuitos y φ el defasaje producido por cada uno de éstos, la potencia total es:

$$W = 3\ UI' \cos \varphi.$$

Ahora bien, si I es la corriente eficaz en cada línea, se ha visto que:

$$I = I' \sqrt{3}, \quad \text{de donde:} \quad I' = \frac{I}{\sqrt{3}};$$

luego:

$$W = 3 \frac{UI}{\sqrt{3}} \cos \varphi, \qquad W = UI \sqrt{3} \cos \varphi.$$

Regulación de los alternadores. — Cuando la corriente producida por los alternadores aumenta, la d. d. p. eficaz en los bornes disminuye en general; esta disminución es debida a la caída óhmica en el inducido y a la reacción del inducido.

La caída de tensión es tanto mayor cuanto menor es el factor de potencia en el circuito exterior; además, a igualdad de circuito exterior, esta caída varía considerablemente de un alternador a otro, y siempre es suficiente para que la corriente gastada en corto-circuito no sea peligrosa, si no dura mucho tiempo.

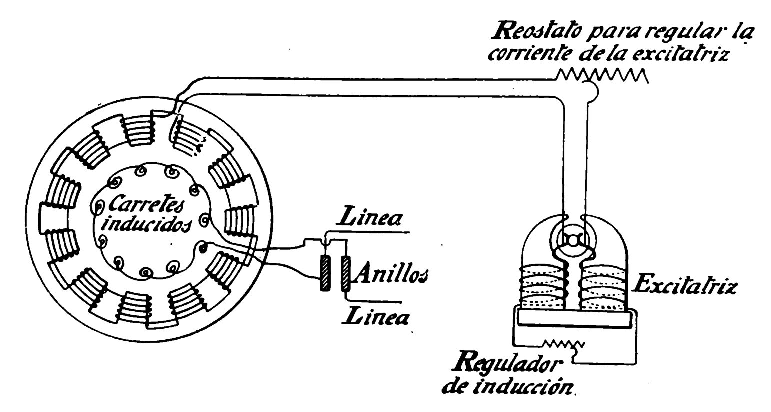


Fig. 357.

Para los alternadores con poca caída de tensión, la corriente de corto-circuito no excede de cinco o seis veces su valor normal; para los alternadores con mucha caída de tensión es de unas diez veces la intensidad normal.

Para mantener la d. d. p. constante en los bornes

del alternador, se actúa sobre el regulador de inducción de su excitatriz. Algunas veces, muy raras por cierto, se recurre a un reostato colocado en el circuito de los inductores (fig. 357).

En algunos casos es necesario obtener una regulación automática. Se consigue este resultado por procedimientos especiales: entonces se dice que la máquina está *compoundada*. Si el montaje está hecho de modo que la d. d. p. aumente con el gasto, se dice que la máquina está *hipercompoundada*.

Acoplamiento de los alternadores.—Consideremos dos alternadores capaces de dar con la misma velocidad, f. e. m. iguales y del mismo período, y queremos acoplarlos como lo hicimos para las máquinas de corriente continua.

I. Acoplamiento en serie.—Supongamos que dos alternadores (1) y (2) acoplados en serie tengan en un instante dado la misma f. e. m. $e_1 = e_2$ y estén en concordancia de fase. La f. e. m. resultante tiene un valor eficaz igual a la suma de los valores eficaces de las f. e. m. de cada uno de ellos:

$$E_{ef} = E_{1\,ef} + E_{2\,ef}.$$

Si ambos alternadores envían la corriente a un circuito cuyo factor de potencia es cos φ, producido por una cierta auto-inducción, la corriente estará retrasada respecto a e del ángulo φ (fig. 358).

Supongamos que por una causa cualquiera, la velocidad del alternador (1) aumenta, de donde resultará: 1.º, un aumento de E_1; 2.º, un avance de la fase de E_1 sobre la de E_2, y la f. e. m. resultante estará defasada de un ángulo φ_1 en atraso respecto a E_1 y de un ángulo φ_2 en adelanto sobre E_2 (fig. 359).

Por consiguiente I está retrasada de a sobre E_1 y de b sobre E_2. Pero $a > b$, luego $\cos a < \cos b$.

La potencia producida por el alternador (1), que era $E_1 I \cos \varphi$, se ha hecho igual a $E_1 I \cos a$, es decir, que ha disminuído, puesto que $a > \varphi$ y por lo tanto $\cos a < \cos \varphi$; la potencia producida por el alternador (2) se ha hecho igual a $E_2 I \cos b$, es decir, que ha aumentado por ser $b < \varphi$ y por consiguiente $\cos b > \cos \varphi$.

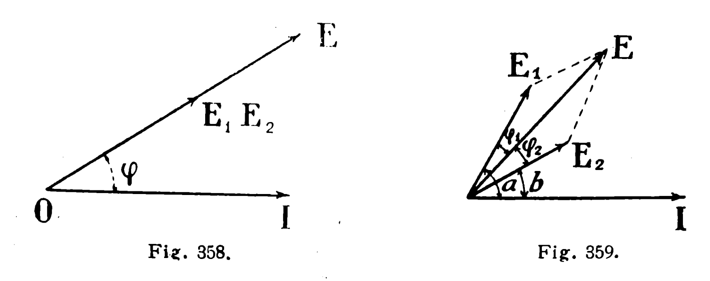


Fig. 358. Fig. 359.

Se comprende fácilmente que la disminución de carga del alternador (1) tiene por efecto aumentar su velocidad, mientras que el aumento de carga de (2) tiende a disminuir su velocidad. Es decir, que la separación entre las fases va aumentando y la marcha será inestable.

Si el defasaje de la corriente sobre la f. e. m. fuera en adelanto (fig. 360) se ve que, cuando el alternador (1) aumente de velocidad, su f. e. m. está defasada en adelanto sobre la de (2) y, por consiguiente, el defasaje de E_1 sobre I disminuye, haciéndose igual a a, y el de E_2 aumenta hasta hacerse b.

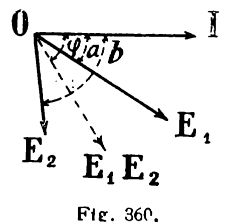


Fig. 360.

La potencia $W_1 = E_1 I \cos \varphi$ ha *aumentado,* habiéndose hecho igual a $E_1 I \cos a$.

La potencia $W_2 = E_2 I \cos \varphi$ ha *disminuído,* habiéndose hecho igual a $E_2 I \cos b$.

Por haber aumentado la carga del primer alternador, su velocidad tiende a disminuir; en cambio la del segundo alternador tiende a aumentar, de modo que se restablece la concordancia de fase.

Así se tendría una marcha estable. Como en la práctica el defasaje de la corriente está siempre en atraso sobre la f. e. m., se puede decir que, prácticamente, el acoplamiento en serie de dos alternadores es imposible.

II. Acoplamiento en paralelo.—Para que dos alternadores puedan acoplarse en paralelo, es preciso que obren en cada instante como dinamos de corriente continua acopladas en paralelo, es decir, que sus f. e. m. sean en cada instante iguales y opuestas. Por consiguiente habrá que realizar y mantener las condiciones siguientes:

1.ª Igualdad de f. e. m. eficaces;
2.ª Igualdad de frecuencia;
3.ª Oposición de fases.

Estas condiciones pueden realizarse fácilmente en el momento del arranque, del modo que ya veremos; además, una vez realizadas se mantienen automáticamente, porque si la velocidad de uno de los motores cambia, los dos alternadores no están en oposición, y en cada instante la f. e. m. de uno de ellos es mayor que la del otro, resultando una corriente de circulación llamada corriente de *sincronización* que tiende a poner las dos f. e. m. en oposición.

En efecto, supongamos que los dos alternadores funcionan, cumpliendo las condiciones anteriores; ambos tienen las mismas f. e. m. eficaces E en oposición, estando sometido el circuito exterior a la f. e. m. E y cada alternador produce la mitad de la corriente total (fig. 361).

Las f. e. m. de los dos alternadores (1) y (2) están

representadas respectivamente por los vectores OA y OB, iguales y opuestos (fig. 362).

Si uno de los motores, el del alternador (1), por ejemplo, aumenta la velocidad, la f. e. m. de (1) aumenta y se adelanta sobre la de (2). Las dos f. e. m. estarán representadas por los vectores OA_1, OB, y la f. e. m. resultante estará dada por la diagonal OC. Bajo la influencia de esta f. e. m., se origina una corriente de circulación en los alternadores, y la corriente estará defasada en atraso sobre la f. e. m. a causa de su auto-inducción; sea OD el vector que la representa. Se ve que la corriente está defasada de un ángulo a menor de 90° sobre la f. e. m. del alternador (1), cuya velocidad ha aumentado, y de un ángulo b mayor de 90° sobre la del alternador (2). Por consiguiente (página 443) el alternador (2) obra como motor y recibirá energía del alternador (1). De aquí resulta que la velocidad de (2) tiende a aumentar y la de (1) a disminuir, lo cual hará que los dos alternadores lleguen a estar en oposición de fase, es decir, al *sincronismo*.

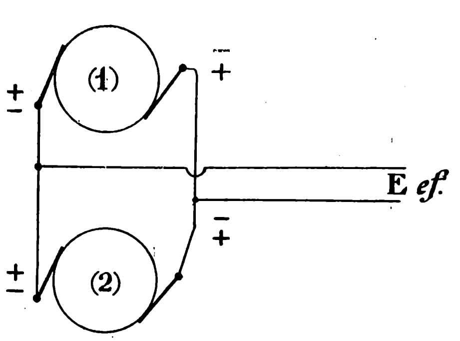


Fig. 361.

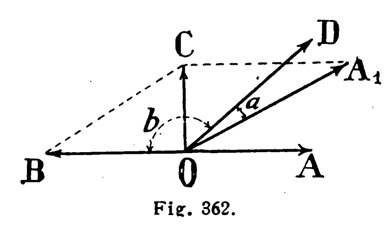


Fig. 362.

Luego el funcionamiento de dos alternadores en paralelo es estable.

Manera de hacer el acoplamiento.—Supongamos que se tiene un alternador que envía la corriente a una red y que se quiere, en un momento dado, acoplarle otro alternador. Se procede de la manera siguiente:

1.° Se pone en marcha el segundo alternador a su velocidad normal;

2.° Actuando sobre su excitatriz se lleva su tensión al mismo valor que la del alternador en servicio;

3.° Se observa un *indicador de fase* y en el momento en que se ve que las dos f. e. m. están en oposición, se cierra el interruptor que comunica el alternador con la red.

Para repartir las cargas sobre las dos máquinas, se actúa sobre los pares motores de los motores que las mueven (por ejemplo sobre el regulador de las máquinas de vapor o sobre la compuerta de las turbinas), haciendo variar la excitatriz para atenuar la caída de tensión en el inducido.

Regulación de la velocidad.—Es evidente que mientras mayor es el número de polos del alternador, menores son las variaciones de velocidad; puede suceder que en el momento en que el alternador se conecta a la red, la disminución de velocidad producida sea suficiente para que las corrientes de sincronización no puedan suplir esta variación y entonces el acoplamiento sea imposible. Este inconveniente puede evitarse del modo siguiente.

Se hace que el alternador envíe la corriente a varias lámparas, antes de acoplarlo, de modo que quede cargado convenientemente; cuando la igualdad de f. e. m. y la oposición de fase están realizadas, se cierra el interruptor y se suprimen poco a poco las lámparas.

Se puede también actuar sobre el regulador del motor que mueve al alternador, de modo que disminuya la velocidad de vacío y obtener la que tendría estando cargado; después, durante el acoplamiento, se vuelve el regulador a su posición primitiva.

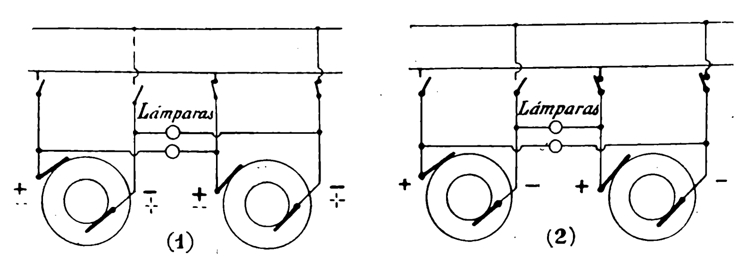


Fig. 363.

Indicador de fase.—Los indicadores de fase están constituídos en general por lámparas dispuestas como indican los esquemas (1) y (2) (fig. 363).

Es fácil ver que con el primer montaje la oposición de fase se obtiene cuando las lámparas están apagadas; al contrario, esta condición se cumple en el montaje (2) cuando las lámparas tienen el brillo máximo.

CAPÍTULO XVIII

Cálculos relativos a las corrientes alternas

Componentes de la tensión y de la corriente

Hemos visto que si entre los extremos de un conductor de resistencia R ohms, cuyo coeficiente de auto-inducción es $\mathcal{L}$ henrys, hay una diferencia de potencial de valor eficaz U volts, de frecuencia N períodos por segundo, y por consiguiente de pulsación $\omega=2\pi N$, este conductor es recorrido por una corriente de igual pulsación ω, cuyo valor eficaz I está dado por la relación:

(1) $$I=\frac{U}{\sqrt{R^2+\mathcal{L}^2\omega^2}}.$$

La magnitud $\mathcal{L}\omega$ es la *reactancia* del circuito, que representaremos por la letra s.

La magnitud $\sqrt{R^2+\mathcal{L}^2\omega^2}$, o sea $\sqrt{R^2+s^2}$, es la *impedancia* del circuito.

La corriente está defasada en *atraso* respecto a la d. d. p. de un ángulo φ tal, que:

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{\mathcal{L}\omega}{R}=\frac{s}{R},$$

de donde se deduce (pág. 373):

(2) $$\cos\varphi=\frac{R}{\sqrt{R^2+s^2}} \quad \text{y} \quad \operatorname{sen}\varphi=\frac{s}{\sqrt{R^2+s^2}}.$$

De la relación (1) se deduce:

$$U = I\sqrt{R^2 + s^2}. \tag{3}$$

Componentes de la tensión. — *La componente wattada,* proyección del vector que representa la tensión sobre el vector que representa la corriente, es (véase fig. 367):

$$U_w = U\cos\varphi,$$

o sea:

$$U_w = I\sqrt{R^2 + s^2} \times \frac{R}{\sqrt{R^2 + s^2}} = RI \text{ volts.}$$

La componente dewattada, proyección del vector que representa la tensión sobre la dirección perpendicular a la del vector que representa la corriente, es:

$$U_{dw} = U\,\text{sen}\,\varphi = I\sqrt{R^2 + s^2} \times \frac{s}{\sqrt{R^2 + s^2}} = Is \text{ volts.}$$

Componentes de la corriente. — La relación (1) puede escribirse del modo siguiente:

$$I = \frac{U\sqrt{R^2 + s^2}}{R^2 + s^2} = U\sqrt{\frac{R^2 + s^2}{(R^2 + s^2)^2}} =$$

$$= U\sqrt{\frac{R^2}{(R^2 + s^2)^2} + \frac{s^2}{(R^2 + s^2)^2}}.$$

La magnitud $\frac{R}{R^2 + s^2}$ es la *conductancia* del circuito, que representaremos por la letra ρ.

La magnitud $\frac{s}{R^2 + s^2}$ es la *susceptancia* del circuito, que representaremos por la letra σ.

Es decir, que:

$$I = U\sqrt{\rho^2 + \sigma^2}.$$

La magnitud $\sqrt{\rho^2 + \sigma^2}$ es la *admitancia* del conductor.

Entre estas diferentes magnitudes hay las relaciones:

$$(4) \qquad \rho = \frac{R}{R^2 + s^2}, \qquad \sigma = \frac{s}{R^2 + s^2},$$

de donde:

$$\rho^2 + \sigma^2 = \frac{R^2 + s^2}{(R^2 + s^2)^2} = \frac{1}{R^2 + s^2},$$

o sea:

$$R^2 + s^2 = \frac{1}{\rho^2 + \sigma^2} \qquad \text{y} \qquad \sqrt{R^2 + s^2} = \frac{1}{\sqrt{\rho^2 + \sigma^2}}.$$

De las igualdades (4) se deduce:

$$R = \rho\,(R^2 + s^2) = \frac{\rho}{\rho^2 + \sigma^2} \qquad \text{y} \qquad s = \sigma\,(R^2 + s^2) = \frac{\sigma}{\rho^2 + \sigma^2}.$$

Sustituyendo en las igualdades (2) $\sqrt{R^2 + s^2}$, R y s por sus valores, se tiene:

$$\cos\varphi = \frac{\rho}{\rho^2 + \sigma^2} \times \sqrt{\rho^2 + \sigma^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{\rho^2 + \sigma^2}}$$

$$\operatorname{sen}\varphi = \frac{\sigma}{\rho^2 + \sigma^2} \times \sqrt{\rho^2 + \sigma^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{\rho^2 + \sigma^2}}$$

y dividiendo sen φ por cos φ resulta:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\sigma}{\rho}.$$

La componente wattada de la corriente tiene por valor (fig. 364):

$$I_w = I \cos \varphi,$$

o sea:

$$I_w = U\sqrt{\rho^2 + \sigma^2} \times \frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 + \sigma^2}} = U\,\rho \text{ amperes.}$$

La componente dewattada tiene por valor:

$$I_{dw} = I \operatorname{sen} \varphi,$$

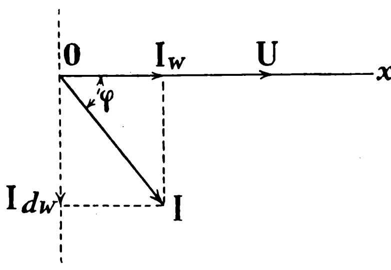


Fig. 364.

o sea:

$$I_{dw} = U\sqrt{\rho^2 + \sigma^2} \times \frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 + \sigma^2}} = U\,\sigma \text{ amperes.}$$

Si el conductor tiene una resistencia R ohms y una capacidad C farads, la corriente es:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\,\omega^2}}}.$$

La magnitud $\frac{1}{C\,\omega}$ se llama también *reactancia* y la representaremos, como en el caso de circuito inductivo, por la letra s, de modo que se tiene:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + s^2}}.$$

Todos los resultados precedentes relativos a un conductor inductivo se aplican a un conductor con capacidad. Pero en este último caso la corriente está defasada en *adelanto* sobre la tensión, mientras que si el conductor es inductivo, está defasada en *atraso*.

Por consiguiente:

La componente wattada de la tensión entre los extremos de un conductor tiene por valor el producto de la corriente en este conductor por su resistencia óhmica:

$$U_w = RI.$$

La componente dewattada de la tensión tiene por valor el producto de la corriente por la reactancia del conductor:

$$U_w = sI.$$

El valor de la tensión está dado por la longitud de la suma geométrica de sus dos componentes:

$$U = \sqrt{U_w^2 + U_{dw}^2}.$$

La componente wattada de la corriente en un conductor tiene por valor el producto de la tensión que hay entre los extremos de este conductor por su conductancia:

$$I_w = U \rho.$$

La componente dewattada de la corriente tiene por valor el producto de la tensión por la susceptancia del conductor:

$$I_{dw} = U \sigma.$$

El valor de la corriente está dado por la suma geométrica de sus dos componentes:

$$I = \sqrt{I_w^2 + I_{dw}^2}.$$

Conductores montados en serie

Sea un circuito formado por varios conductores A, B, C, D, E, F montados en serie (fig. 365). A y D tienen respectivamente por resistencia R_1 y R_2 ohms, y por coeficientes de auto-inducción $\mathcal{L}_1$ y $\mathcal{L}_2$ henrys; B y E tienen por capacidades C_1 y C_2; el conductor C

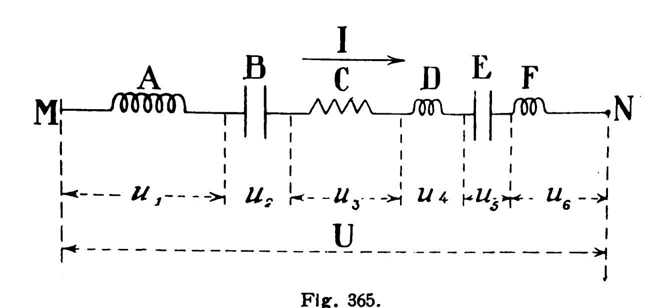


Fig. 365.

no tiene auto-inducción, siendo su resistencia R_3, y F es un conductor de resistencia despreciable cuyo coeficiente de auto-inducción es $\mathcal{L}_3$.

Sea U la tensión eficaz entre los extremos M y N, y sea I la corriente eficaz en el circuito.

Consideremos un instante dado, y supongamos que sea u la tensión entre M y N, y u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6 las tensiones en este momento entre los extremos de los conductores A, B, C, D, E, F. Es evidente que entre estas diferentes magnitudes instantáneas existen las mismas relaciones que en el caso de corrientes continuas (pág. 81); luego se tiene:

$$u = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + u_5 + u_6.$$

De esta igualdad resulta que la tensión eficaz U está medida por el vector OK, suma geométrica de

los vectores que representan cada una de las tensiones $u_1, u_2, \ldots, u_6$ (fig. 366).

La *tensión* u_1 tiene un valor eficaz igual a $U_1 = I \sqrt{R_1^2 + \mathcal{L}_1^2 \omega_1^2}$, está defasada en adelanto sobre la corriente I del ángulo φ_1, tal que tg $\varphi_1 = \frac{\mathcal{L}_1 \omega}{R_1}$, y está representada por el vector OA.

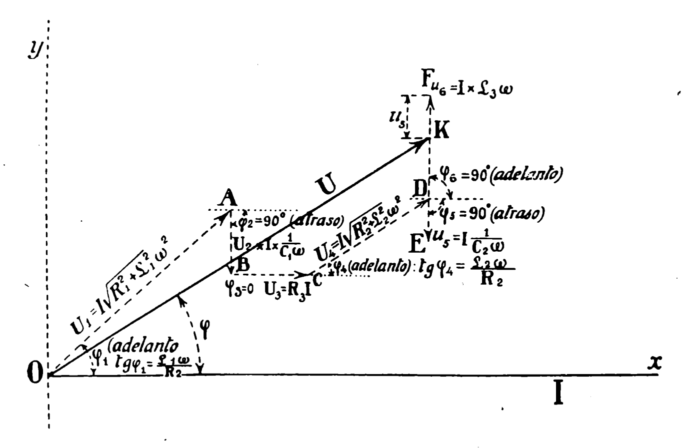


Fig. 366.

u_2 tiene por valor eficaz $U_2 = I \times \frac{1}{C_1 \omega}$ y está defasada en atraso respecto a I de 90°: está representada por el vector AB.

u_3 tiene por valor eficaz $R_3 I_1$, está en fase con I y está representada por el vector BC.

u_4 tiene por valor eficaz $I \sqrt{R_2^2 + \mathcal{L}_2^2 \omega^2}$, está defasada en adelanto sobre I de φ_4, tal que tg $\varphi_4 = \frac{\mathcal{L}_2 \omega}{R_2}$ y está representada por CD.

u_5 tiene por valor eficaz $I \times \frac{1}{C_2 \omega}$, está defasada de 90° en atraso respecto a I y está representada por DE.

u_6 tiene por valor $\mathcal{L}_3 \omega I$, está defasada de 90° en adelanto sobre I y está representada por el vector DF.

El extremo K de la resultante U se obtiene tomando: $DK = DF - DE$.

También puede obtenerse geométricamente el valor de U descomponiendo cada una de las tensiones u_1, $u_2, \ldots, u_6$ en sus componentes wattada y dewattada. Todas las componentes wattadas están dirigidas según el mismo eje Ox (en la dirección que debe tener el vector que representa la corriente) y en el mismo sentido.

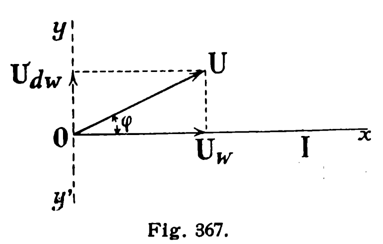


Fig. 367.

Todas las componentes dewattadas deben estar sobre un eje perpendicular al primero: en el sentido Oy, es decir, en *adelanto* sobre la corriente, cuando la reactancia es debida a una auto-inducción; en sentido inverso Oy', es decir, en *atraso* respecto a la corriente, cuando la reactancia es debida a una capacidad (figura 367). La suma geométrica de las componentes wattadas, cuyo valor es igual a la suma algebraica, es la componente wattada de la tensión U; del mismo modo, la suma algebraica de las componentes dewattadas da el valor de la componente dewattada de la tensión U.

La componente wattada de U es, por consiguiente:

$$U_w = R_1 I + R_2 I + R_3 I = I (R_1 + R_2 + R_3),$$

es decir, que es igual al producto de la corriente por la suma de la resistencia óhmica de cada conductor.

En general, si se representa por ΣR esta suma, se tiene:

$$U_w = I \cdot \Sigma R.$$

La componente dewattada es:

$$U_{dw} = \mathcal{L}_1 \omega I + \mathcal{L}_2 \omega I + \mathcal{L}_3 \omega I - \frac{1}{C_1 \omega} I - \frac{1}{C_2 \omega} I$$

$$U_{dw} = I \left(\mathcal{L}_1 \omega + \mathcal{L}_2 \omega + \mathcal{L}_3 \omega - \frac{1}{C_1 \omega} - \frac{1}{C_2 \omega} \right).$$

Por consiguiente, si se representan por s_1, s_2, s_3 las reactancias debidas a las auto-inducciones, y si se

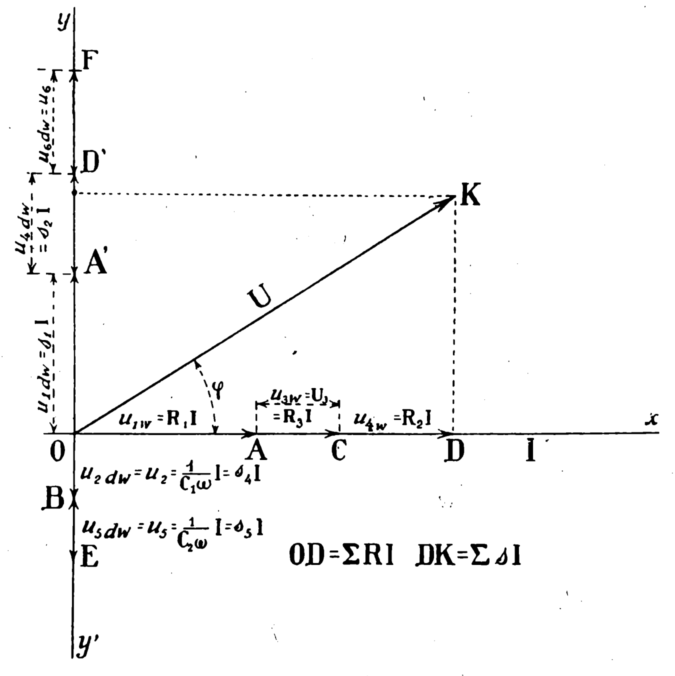


Fig. 368.

admite convencionalmente que las reactancias debidas a las capacidades son valores algebraicos negativos:

$$s_4 = -\frac{1}{C_1 \omega} \qquad s_5 = -\frac{1}{C_2 \omega}$$

se tendrá:

$$U_{dw} = I\,(s_1 + s_2 + s_3 + s_4 + s_5).$$

En general, si $\Sigma\, s$ es la suma de las reactancias, teniendo en cuenta la convención de signos, tendremos:

$$U_{dw} = I \cdot \Sigma\, s.$$

Siendo la tensión U la resultante de U_w y U_{dw}, se tiene:

$$U = \sqrt{U_w^2 + U_{dw}^2} = I\sqrt{(\Sigma\, R)^2 + (\Sigma\, s)^2}.$$

El circuito obra, pues, como un solo conductor cuya resistencia es $\Sigma\, R$ y la reactancia $\Sigma\, s$.

Por consiguiente: *Cuando varios conductores están montados en serie, la resistencia del circuito formado es igual a la suma de las resistencias de cada uno de ellos, y la reactancia del sistema es igual a la suma de las reactancias de cada uno, precedidas del signo — las reactancias debidas a las capacidades.*

El defasaje de la corriente en el circuito sobre la tensión aplicada es φ, dado por la relación:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{KD}{OD} = \frac{I\,\Sigma\, s}{I\,\Sigma\, R} = \frac{\Sigma\, s}{\Sigma\, R}.$$

El factor de potencia del circuito es, por lo tanto:

$$\cos \varphi = \frac{\Sigma\, R}{\sqrt{(\Sigma\, R)^2 + (\Sigma\, s)^2}}.$$

La potencia absorbida por el circuito es:

$$W = UI\cos\varphi = I\sqrt{(\Sigma\, R)^2 + (\Sigma\, s)^2} \times I \times \frac{\Sigma\, R}{\sqrt{(\Sigma\, R)^2 + (\Sigma\, s)^2}}$$

o sea:

$$W = I^2 \cdot \Sigma\, R \text{ watts.}$$

Conductores montados en paralelo

Sea un circuito formado por cinco conductores *A*, *B*, *C*, *D* y *E* montados en paralelo (fig. 369).

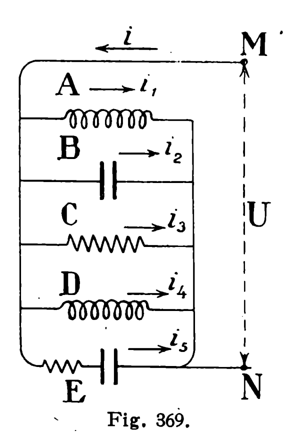


Fig. 369.

El conductor *A* tiene por resistencia R_1 y por coeficiente de auto-inducción $\mathcal{L}_1$ (reactancia $s_1 = \mathcal{L}_1 \omega$); el conductor *B* tiene por capacidad C_1 $\left(\text{reactancia } s_2 = -\dfrac{1}{C_1 \omega} \right)$; *C* tiene por resistencia R_2 y auto-inducción cero; *D* tiene por resistencia R_3 y por coeficiente de auto-inducción $\mathcal{L}_2$ (reactancia $s_3 = \mathcal{L}_2 \omega$); *E* tiene por resistencia R_4 y por capacidad C_2 $\left(\text{reactancia } s_4 = -\dfrac{1}{C_2 \omega} \right)$.

Las conductancias y susceptancias de los conductores derivados, dadas por las fórmulas generales:

$$\rho = \frac{R}{R^2 + s^2}, \qquad \sigma = \frac{s}{R^2 + s^2},$$

tienen por valores:

Conductor *A*.. $\rho_1 = \dfrac{R_1}{R_1^2 + s_1^2}$, $\sigma_1 = \dfrac{s}{R_1^2 + s_1^2}$; $(s_1 = \mathcal{L}_1 \omega)$.

Conductor *B*.. $\rho_2 = 0$, $\sigma_2 = \dfrac{1}{s_2}$; $\left(s_2 = -\dfrac{1}{C_1 \omega}\right)$.

Conductor *C*.. $\rho_3 = \dfrac{1}{R_2}$, $\sigma_3 = 0$;

Conductor *D*.. $\rho_4 = \dfrac{R_3}{R_3^2 = s_3^2}$, $\sigma_4 = \dfrac{s_3}{R_3^2 + s_3^2}$; $(s_3 = \mathcal{L}_2 \omega)$.

Conductor *E*.. $\rho_5 = \dfrac{R_4}{R_4^2 + s_4^2}$, $\sigma_5 = \dfrac{s_4}{R_4^2 + s_4^2}$; $\left(s_4 = -\dfrac{1}{C_2 \omega}\right)$.

Sea U la tensión eficaz entre los extremos M y N del circuito, e I la corriente eficaz total.

Consideremos un instante determinado, y sean i, i_1, i_2, i_3, i_4, i_5 los valores de la corriente total y de las corrientes en cada uno de los conductores derivados, en dicho instante.

Se tiene evidentemente la relación:

$$i = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5.$$

Es decir, que el valor de la corriente eficaz I está dado por la longitud de la resultante de los vectores que representan las corrientes i_1, i_2,. ., i_5.

La corriente en A tiene por valor eficaz:

$$I_1 = U\sqrt{\rho_1^2 + \sigma_1^2}$$

y está defasada *en atraso* respecto a U del ángulo φ_1:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\sigma_1}{\rho_1}.$$

La corriente en B tiene por valor eficaz:

$$I_2 = U\sigma_2 = U \times \frac{1}{C_1\omega}$$

y está defasada de 90° *en adelanto* sobre U.

La corriente en C tiene por valor:

$$I_3 = U \cdot \rho_3 = U \times \frac{1}{R_2}$$

y está *en fase* con U.

La corriente en D vale:

$$I_4 = U\sqrt{\rho_4^2 + \sigma_4^2}$$

y está defasada *en atraso* respecto a U del ángulo φ_2, tal que $\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\sigma_4}{\rho_4}$.

La corriente en E tiene por valor:

$$I_5 = U\sqrt{\rho_5^2 + \sigma_5^2}$$

y está defasada *en adelanto* sobre U del ángulo φ_3, tal que $\operatorname{tg}\varphi_3 = \frac{\sigma_5}{\rho_5}$.

La corriente total I está medida por la resultante OK y el defasaje de esta corriente sobre la tensión U es el ángulo φ (fig. 370).

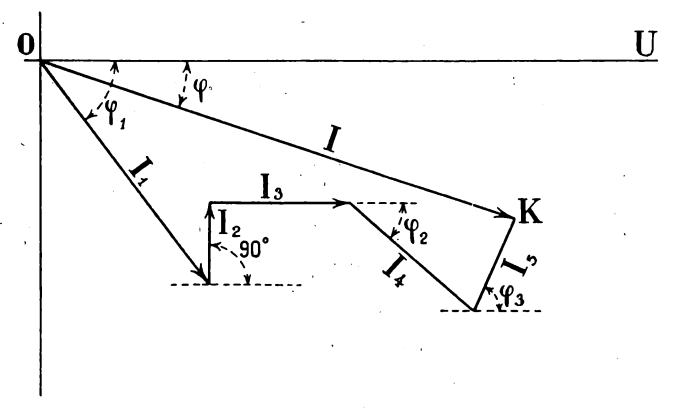


Fig. 370.

Se puede también, como hemos hecho en el caso de los conductores montados en serie, sumar todas las componentes wattadas de las diferentes corrientes derivadas y todas las componentes dewattadas: la resultante de los dos vectores perpendiculares, que representan estas dos sumas, da la corriente I (fig. 371).

$$OA = I_{1w} = U\rho_1; \qquad OA' = I_{1dw} = U\sigma_1.$$

$$OB = I_{2dw} = I_2 = -U\sigma_2 \qquad (I_{2w} = 0).$$

$$AC = I_{3w} = I_3 = U\rho_3 = U \times \frac{1}{R} \qquad (I_{3dw} = 0).$$

$$CD = I_{4w} = U\rho_4; \qquad A'D' = I_{4dw} = U\sigma_4.$$

$$DE = I_{5w} = U\rho_5; \qquad BE' = I_{5dw} = -U\sigma_5.$$

La suma de las componentes wattadas es:

$$OE = U\rho_1 + U\rho_3 + U\rho_4 + U\rho_5 = U(\rho_1 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5).$$

La suma de las componentes dewattadas es:

$$OP = OD' - OE' = U[\sigma_1 + \sigma_4 - (-\sigma_2 - \sigma_5)] =$$
$$= U(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_4 + \sigma_5).$$

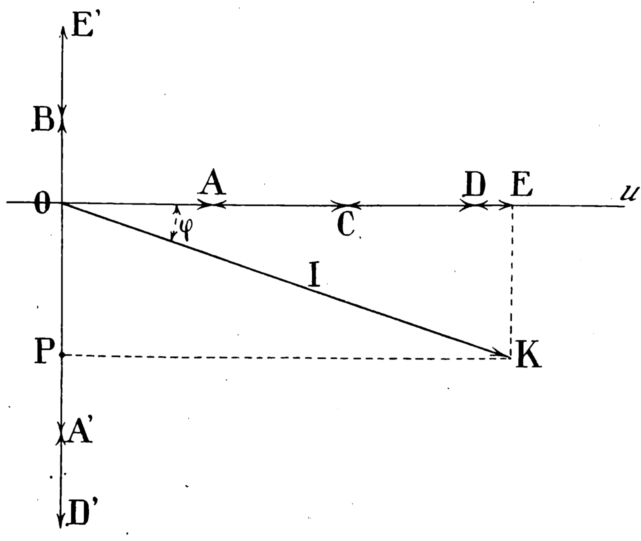


Fig. 371.

La componente wattada de la corriente total es, por consiguiente:

$$I_w = U(\rho_1 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5)$$

y en general, representando por $\Sigma\rho$ la suma de las conductancias de los conductores derivados, se tiene:

$$I_w = U \times \Sigma\rho.$$

La componente dewattada de la corriente total es:

$$I_{dw} = U(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_4 + \sigma_5)$$

y representando por $\Sigma\sigma$ la suma de las susceptancias de los conductores:

$$I_{dw} = U \times \Sigma\sigma.$$

La corriente total I tiene por lo tanto el valor:

$$I = \sqrt{I_w^2 + I_{dw}^2} = U\sqrt{(\Sigma\rho)^2 + (\Sigma\sigma)^2}.$$

Por consiguiente: *Cuando un circuito está formado por conductores montados en paralelo, obra como un conductor único cuya conductancia es igual a la suma de las conductancias de todos los conductores derivados y cuya susceptancia es igual a la suma de las susceptancias de los conductores derivados.*

El defasaje φ de la corriente total respecto a la tensión está dado por la relación:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{KE}{OE} = \frac{OP}{OE} = \frac{I\Sigma\sigma}{I\Sigma\rho} = \frac{\Sigma\sigma}{\Sigma\rho}$$

y el factor de potencia del circuito es:

$$\cos\varphi = \frac{\Sigma\rho}{\sqrt{(\Sigma\rho)^2 + (\Sigma\sigma)^2}}.$$

La potencia gastada en el circuito es:

$$W = UI\cos\varphi = U \times U\sqrt{(\Sigma\rho)^2 + (\Sigma\sigma)^2} \times \frac{\Sigma\rho}{\sqrt{(\Sigma\rho)^2 + (\Sigma\sigma)^2}},$$

$$W = U^2\,\Sigma\rho \text{ watts.}$$

APLICACIONES. — I. *Se quiere transportar por corrientes alternas monofásicas, de frecuencia* N, *con un rendimiento* a, *una potencia* W *watts utilizada en una estación receptora situada a* λ *kilómetros*

de la fábrica generadora. Se da el factor de potencia cos φ *del conjunto de los receptores, y la tensión* U *en la estación receptora. Calcular: la sección del conductor, la tensión a la salida de la fábrica generadora y el factor de potencia de la instalación. Se admite que la capacidad de la línea es despreciable.*

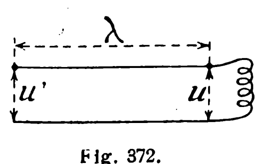


Fig. 372.

La corriente I en la línea está dada por la relación:

$$W = UI \cos \varphi,$$

de donde:

$$I = \frac{W}{U \cos \varphi}.$$

Siendo el rendimiento a, la potencia producida por la fábrica generadora debe ser:

$$W_1 = \frac{W}{a}$$

y la potencia perdida en la línea es:

$$W_1 - W = \frac{W}{a} - W = W\left(\frac{1}{a} - 1\right).$$

Si R es la resistencia de la línea, esta pérdida de potencia tiene también por valor:

$$RI^2 \text{ watts}.$$

Por consiguiente:

$$RI^2 = W\left(\frac{1}{a} - 1\right),$$

de donde:

$$R = \frac{W}{I^2}\left(\frac{1}{a} - 1\right) = \frac{W\left(\frac{1}{a} - 1\right)}{\frac{W^2}{U^2 \cos^2 \varphi}} = \frac{U^2 \cos^2 \varphi\left(\frac{1}{a} - 1\right)}{W}.$$

Si K microhms-centímetro es la resistividad del metal de que está hecha la línea, la sección s del conductor ha de ser tal, que expresada en milímetros cuadrados satisfaga la siguiente condición:

$$R = \frac{K}{100} \times \frac{2\lambda \times 1000}{s} = \frac{20\, K\lambda}{s},$$

de donde:

$$s = \frac{20\, K\lambda}{R}.$$

La tensión dada U determina la distancia d entre los dos conductores, y conociendo s y d se puede hallar el coeficiente de auto-inducción l por kilómetro de la línea (tabla de la pág. 472), expresada en henrys.

El coeficiente de auto-inducción de la línea será por lo tanto: $\mathcal{L} = \lambda l$ henrys.

Determinación de la tensión a la salida de la central generadora. — a) *Solución gráfica.* — Supongamos los siguientes valores instantáneos:

u, tensión en la estación receptora;
e, caída de tensión en la línea;
u', tensión a la salida de la central generadora.

Se tiene evidentemente:

$$u' = u + e.$$

Tomemos por origen de las fases la fase de la corriente Ox (fig. 373).

u está representada por un vector, defasado en

adelanto sobre la corriente, de un ángulo φ cuyo coseno es conocido, y la longitud U de este vector medida en una escala arbitraria es OA;

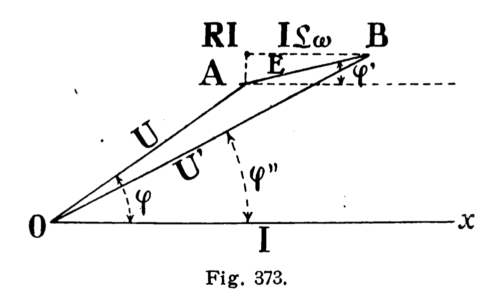


Fig. 373.

e está representada por el vector AB defasado sobre I del ángulo φ', tal que:

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{\mathcal{L}\omega}{R} \qquad (\omega = 2\pi N).$$

La longitud de este vector mide en la escala tomada, la magnitud:

$$E = I\sqrt{R^2 + \mathcal{L}^2\omega^2},$$

en que todas las cantidades del segundo miembro son conocidas.

La longitud OB mide, en la misma escala, la tensión U' a la salida de la central generatriz.

El ángulo $\varphi'' = BOx$ es el defasaje de la corriente sobre la tensión U'; $\cos\varphi''$ es el factor de potencia de la instalación.

b) *Solución algebraica.* — Designemos por R' la resistencia aparente y por $\mathcal{L}'\omega$ la reactancia aparente de la instalación receptora; estas magnitudes están definidas por las relaciones:

$$UI\cos\varphi = R' I^2 \quad \text{y} \quad UI \operatorname{sen}\varphi = \mathcal{L}'\omega I^2,$$

de donde:

$$R' = \frac{U \cos \varphi}{I} \quad \text{y} \quad \mathcal{L}' \omega = \frac{U \operatorname{sen} \varphi}{I}.$$

La instalación está por lo tanto constituída por dos conductores en serie que tienen respectivamente por resistencias óhmicas los valores R y R' antes calculados y por reactancias los valores $\mathcal{L}\omega$ y $\mathcal{L}'\omega$ también calculados. La tensión a la salida de la central generatriz es, pues:

$$U' = I \sqrt{(R + R')^2 + (\mathcal{L} + \mathcal{L}' \omega)^2}.$$

El defasaje de la corriente I sobre U' es φ'' tal, que:

$$\operatorname{tg} \varphi'' = \frac{\mathcal{L}\omega + \mathcal{L}' \omega}{R + R'}$$

y el factor de potencia de la instalación es:

$$\cos \varphi'' = \frac{R + R'}{\sqrt{(R + R')^2 + (\mathcal{L}\omega + \mathcal{L}' \omega)^2}}.$$

Ejemplo:

Potencia útil transportada: 240 kilowatts.	$W = 240000$
Frecuencia: 50.	$\omega = 2 \times 3{,}14 \times 50 = 314$
Distancia: 50 kilómetros . .	$\lambda = 50$
Tensión: 12000 volts a la llegada.	$U = 12000$
Factor de potencia de la estación receptora: 0,7 . . .	$\cos \varphi = 0{,}7$
Rendimiento de la línea: 0,87.	$a = 0{,}87$

Corriente de la línea . $I = \dfrac{240000}{12000 \times 0{,}7} = 28{,}5$ amperes.

Resistencia de la línea. $R = \dfrac{240000}{28{,}5^2} \left(\dfrac{1}{0{,}87} - 1 \right) = 44$ ohms.

Sección del conductor. $s = \dfrac{20 \times 1{,}6 \times 50}{44} = 36$ mm^2.

Esta sección corresponde a un diámetro de 6,7 mm., es decir, 7 milímetros aproximadamente.

Para una tensión de 12000 volts se separan los conductores 50 centímetros, lo cual da (tabla de la página siguiente) un coeficiente de auto-inducción igual a 0,001044 por kilómetro, es decir, que el coeficiente de auto-inducción de la línea es:

$$\mathcal{L} = 0{,}001044 \times 50 = 0{,}0522 \text{ henry},$$

o sea que:

$$\mathcal{L}\omega = 0{,}0522 \times 314 = 16.$$

Resistencia aparente del circuito de utilización:

$$R' = \frac{12000 \times 0{,}7}{28{,}5} = 296 \text{ ohms.}$$

Auto-inducción aparente de este circuito:

$$\mathcal{L}'\omega = \frac{12000 \operatorname{sen} \varphi}{28{,}5}; \quad \text{pero} \quad \operatorname{sen} \varphi = \sqrt{1 - 0{,}7^2} = 0{,}71,$$

luego:

$$\mathcal{L}'\omega = \frac{12000 \times 0{,}71}{28{,}5} = 299.$$

Por consiguiente:

$$R + R' = 296 + 44 = 340, \quad \mathcal{L}\omega + \mathcal{L}'\omega = 299 + 16 = 315$$

$$\sqrt{340^2 + 315^2} = 463$$

y

$$U' = 28{,}5 \times 463 = 13200 \text{ volts.}$$

El defasaje de la corriente I sobre U' es φ'', dado por

$$\operatorname{tg} \varphi'' = \frac{315}{340} = 0{,}92$$

y el factor de potencia de la instalación es:

$$\cos \varphi'' = \frac{340}{463} = 0{,}78.$$

Observación. — El coeficiente de auto-inducción por kilómetro de dos líneas, de a cm. de radio, y separadas por una distancia de d centímetros, es:

$$l = \frac{4}{10^4}\left[0{,}25 + \frac{1}{0{,}4343}(\log d - \log a)\right],$$

o bien:

$$\frac{4}{10^4}\left[0{,}25 + 2{,}3025\,(\log d - \log a)\right] \text{ henrys.}$$

La tabla siguiente da los valores de l para diferentes valores de d y de a.

	$d = 25$	$d = 50$	$d = 75$	$d = 100$	$d = 150$
$a = 0{,}05$	0,001292	0,001431	0,001512	0,001570	0,001645
0,10	0,001155	0,001292	0,001372	0,001431	0,001514
0,15	0,001070	0,001209	0,001292	0,001348	0,001430
0,20	0,001017	0,001155	0,001240	0,001292	0,001372
0,25	0,000970	0,001110	0,001190	0,001247	0,001329
0,30	0,000934	0,001070	0,001150	0,001219	0,001292
0,35	0,000905	0,001044	0,001129	0,001183	0,001263
0,40	0,000877	0,001017	0,001087	0,001155	0,001226
0,45	0,000850	0,000990	0,001070	0,001127	0,001212
0,50	0,000832	0,000971	0,001052	0,001110	0,001191

II. Estudiemos el mismo problema teniendo en cuenta las pérdidas a través del aire y de los soportes, y la capacidad de la línea.

Supongamos que las pérdidas que en realidad se efectúan en toda la línea se producen en un conductor situado en el medio, con una resistencia igual a la resistencia de aislamiento r de la línea, y supongamos también que el efecto de la capacidad C es el mismo que el de un condensador de igual capacidad situado en el medio de la línea (fig. 374).

Sean: $2 R_1$ y $2 \mathcal{L}_1 \omega$ la resistencia y la reactancia de los conductores; R_2 y $\mathcal{L}_2 \omega$ la resistencia y la reactancia aparentes del circuito de utilización A, calculadas como ya se ha indicado.

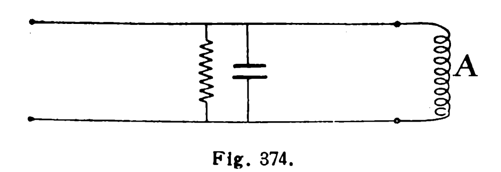


Fig. 374.

El circuito está formado del modo siguiente (figura 375):

1.° Un conductor MN de resistencia R_1 y de reactancia $\mathcal{L}_1 \omega$;

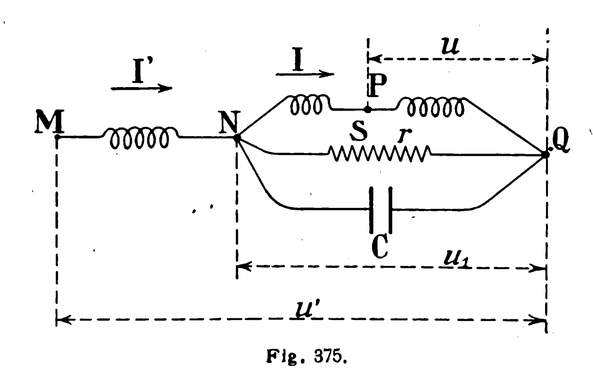


Fig. 375.

2.° En serie con este conductor un grupo de conductores derivados constituído por:

a) Un conductor NP de resistencia R_1 y de reactancia $\mathcal{L}_1 \omega$ en serie con un segundo conductor PQ de resistencia R_2 y de reactancia $\mathcal{L}_2 \omega$;

b) Una resistencia óhmica NSQ, de r ohms;

c) Un condensador NCQ de capacidad C.

Entre los extremos PQ del circuito de utilización hay aplicada la tensión dada U y este circuito está recorrido por la corriente I calculada como anteriormente. Entre N y Q hay una tensión U_1 cuyo valor es:

$$U_1 = I\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (\mathcal{L}_1\,\omega + \mathcal{L}_2\,\omega)^2}\,.$$

Las conductancias y susceptancias de los tres conductores derivados NPQ, NSQ y NCQ son respectivamente:

$$(NPQ)\quad \begin{cases} \rho_1 = \dfrac{R_1 + R_2}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (\mathcal{L}_1\,\omega + \mathcal{L}_2\,\omega)^2}}, \\[2ex] \sigma_1 = \dfrac{\mathcal{L}_1\,\omega + \mathcal{L}_2\,\omega}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (\mathcal{L}_1\,\omega + \mathcal{L}_2\,\omega)^2}}, \end{cases}$$

$$(NSQ)\qquad \rho_2 = \frac{1}{r}, \qquad \sigma_2 = 0,$$

$$(NCQ)\qquad \rho_3 = 0, \qquad \sigma_3 = -\,C\omega.$$

La conductancia y la susceptancia del conjunto son:

$$\rho = \rho_1 + \rho_2$$
$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_3.$$

Luego según las relaciones establecidas en la página 454, el conjunto de estos tres conductores derivados obra como un conductor único de resistencia igual a

$$R = \frac{\rho_1 + \rho_2}{(\rho_1 + \rho_2)^2 + (\sigma_1 + \sigma_3)^2}$$

y de reactancia:

$$\mathcal{L}\omega = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{(\rho_1 + \rho_2)^2 + (\sigma_1 + \sigma_3)^2}.$$

La corriente total que circula por MN tiene por valor:

$$I' = U_1 \sqrt{(\rho_1 + \rho_2)^2 + (\sigma_1 + \sigma_2)^2}\,.$$

El circuito completo obra como si tuviera una resistencia igual a

$$R_1 + R$$

y una reactancia:

$$\mathcal{L}\omega + \mathcal{L}_1\,\omega$$

y es recorrido por la corriente I'; por consiguiente, la tensión que hay que aplicar entre sus extremos MR, es:

$$U' = I' \sqrt{(R_1 + R)^2 + (\mathcal{L}_1\omega + \mathcal{L}\omega)^2}\,.$$

III. *Dos conductores* AB, BC *cuyas resistencias y coeficientes de auto-inducción son respectivamente:* r_1 *ohms,* $\mathcal{L}_1$ *henrys y* r_2 *ohms,* $\mathcal{L}_2$ *henrys, están montados en serie. Entre sus extremos* A *y* C *se aplica una tensión alterna de frecuencia* N *y se quiere derivar sobre el conductor* BC *una resistencia simplemente óhmica tal, que la corriente en* BC *esté en cuadratura con la tensión que hay entre* A *y* C. *Calcular esta resistencia* (fig. 376). La pulsación de la tensión es: $\omega = 2\pi N$ y las reactancias de los dos conductores AB y BC, son:

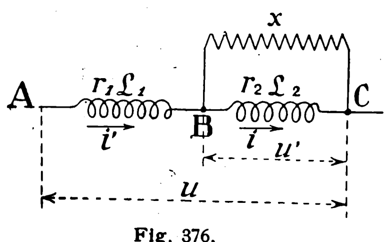


Fig. 376.

$$s_1 = \mathcal{L}_1\,\omega \text{ ohms},$$
$$s_2 = \mathcal{L}_2\,\omega \text{ ohms}.$$

Por consiguiente:

Conductancia de BC . . . . . . $\rho_2 = \frac{r_2}{r_2^2 + s_2^2}$

Susceptancia de BC . . . . . . $\sigma_2 = \frac{s_2}{r_2^2 + s_2^2}$

Conductancia de la resistencia x . $\rho_3 = \frac{1}{x}$

Susceptancia de la resistencia x . $\sigma_3 = 0$.

La corriente i en BC está defasada sobre la tensión u' entre B y C del ángulo φ_1:

(1) $$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{s_2}{r_2} \cdot$$

La conductancia del conjunto de los conductores derivados es:

$$\rho = \frac{1}{x} + \rho_2$$

y su susceptancia:

$$\sigma = \sigma_2 ,$$

de manera que el defasaje de la corriente total i' sobre la tensión U entre A y C es φ_2:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\sigma}{\rho} = \frac{\sigma_2}{\frac{1}{x} + \rho_2} \quad \text{y poniendo} \quad y = \frac{1}{x} + \rho_2$$

(2) $$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\sigma_2}{y} \cdot$$

La resistencia de los dos conductores derivados es:

$$R' = \frac{\rho}{\rho^2 + \sigma^2} = \frac{\frac{1}{x} + \rho_2}{\left(\frac{1}{x} + \rho_2\right)^2 + \sigma_2^2} ;$$

la reactancia del conjunto es:

$$S' = \frac{\sigma}{\rho^2 + \sigma^2} = \frac{\sigma_2}{\left(\frac{1}{x} + \rho_2\right)^2 + \sigma_2^2}$$

y por ser

$$\frac{1}{x} + \rho_2 = y$$

se tiene:

$$R' = \frac{y}{y^2 + \sigma_2^2}, \quad S' = \frac{\sigma}{y^2 + \sigma_2^2}.$$

Es decir, que la resistencia y la reactancia del circuito completo entre A y C es:

$$R = \frac{y}{y^2 + \sigma_2^2} + r_1, \quad S = \frac{\sigma_2}{y^2 + \sigma_2^2} + s_1.$$

El defasaje de la corriente total i sobre la tensión aplicada u, es φ_3:

(3) $$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{\frac{\sigma_2}{y^2 + \sigma_2^2} + s_1}{\frac{y}{y^2 + \sigma_2^2} + r_1} = \frac{\sigma_2 + s_1 (y^2 + \sigma_2^2)}{y + r_1 (y^2 + \sigma_2^2)}.$$

Si OK es la tensión U', el vector OP que forma un ángulo φ_1 con OK representa la corriente i en el conductor BC; la corriente i' en AB forma con u' un ángulo φ_1 y está representada por un vector de dirección OR. Como la tensión U debe estar en cuadratura con la corriente i, esta tensión estará representada

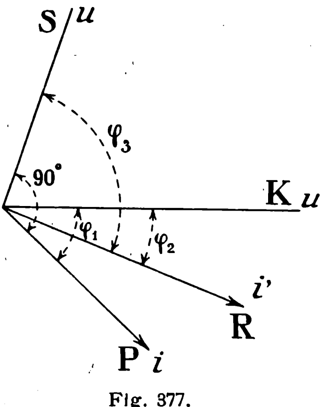


Fig. 377.

por un vector OS perpendicular á OP y el defasaje de i' sobre u, es decir, el ángulo que forma OR con OS es φ_3. En la figura 377 se ve que:

$$\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_1 = 90^\circ,$$

de donde:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 90 - \varphi_3 .$$

Es decir, que:

$$\operatorname{tg} (\varphi_1 - \varphi_2) = \operatorname{cotg} \varphi_3 ,$$

o bien:

$$\operatorname{tg} (\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_3} .$$

Ahora bien:

$$\operatorname{tg} (\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2}{1 + \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_2} .$$

Por consiguiente:

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2}{1 + \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_2} = \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_3} . \tag{4}$$

Sustituyendo en esta igualdad los valores de $\operatorname{tg} \varphi_1$, $\operatorname{tg} \varphi_2$, $\operatorname{tg} \varphi_3$, dados por las relaciones (1), (2) y (3), se tiene:

$$\frac{\dfrac{s_2}{r_2} - \dfrac{\sigma_2}{y}}{1 + \dfrac{s_2\, \sigma_2}{r_2\, y}} = \frac{y + r_1 (y^2 + \sigma_2^2)}{\sigma_2 + s_1 (y^2 + \sigma_2^2)} ,$$

o sea:

$$\frac{s_2 y - \sigma_2 r_2}{r_2 y + s_2 \sigma_2} = \frac{y + r_1 (y^2 + \sigma_2^2)}{\sigma_2 + s_1 (y^2 + \sigma_2^2)} ,$$

de donde:

$$\begin{aligned} s_2 \sigma_2 y - \sigma_2^2 r_2 + s_1 s_2 y (y^2 + \sigma_2^2) - s_1 \sigma_2 r_2 (y^2 + \sigma_2^2) = \\ = r_2 y^2 + s_2 \sigma_2 y + r_1 r_2 y (y^2 + \sigma_2^2) + r_1 s_2 \sigma_2 (y^2 + \sigma_2) \end{aligned}$$

y pasando $-\sigma_2^2 r_2$ al segundo miembro:

$$s_1 s_2 y (y^2 + \sigma_2^2) - s_1 \sigma_2 r_2 (y^2 + \sigma_2^2) = r_2 (y^2 + \sigma_2^2) + \\ + r_1 r_2 y (y^2 + \sigma_2^2) + r_1 s_2 \sigma_2 (y^2 + \sigma_2^2)$$

o bien:

$$s_1 s_2 y - s_1 \sigma_2 r_2 = r_2 + r_1 r_2 y + r_1 s_2 \sigma_2,$$

$$y (s_1 s_2 - r_1 r_2) = r_2 + r_1 s_2 \sigma_2 + s_1 \sigma_2 r_2,$$

$$y (s_1 s_2 - r_1 r_2) = r_2 + \sigma_2 (r_1 s_2 + s_1 r_2),$$

$$y = \frac{r_2 + \sigma_2 (r_1 s_2 + s_1 r_2)}{s_1 s_2 - r_1 r_2}.$$

Poniendo en vez de y, ρ_2 y σ_2 sus valores

$$y = \frac{1}{x} + \rho_2, \qquad \rho_2 = \frac{r_2}{r_2^2 + s_2^2}, \qquad \sigma_2 = \frac{s_2}{r_2^2 + s_2^2},$$

se tiene:

$$\frac{1}{x} + \frac{r_2}{r_2^2 + s_2^2} = \frac{r_2 + \dfrac{s_2}{r_2^2 + s_2^2}(r_1 s_2 + r_2 s_1)}{s_1 s_2 - r_1 r_2}$$

$$\frac{1}{x} = \frac{r_2 (r_2^2 + s_2^2) + s_2 (r_1 s_2 + r_2 s_1)}{(r_2^2 + s_2^2)(s_1 s_2 - r_1 r_2)} - \frac{r_2}{r_2^2 + s_2^2}$$

$$\frac{1}{x} = \frac{r_2 (r_2^2 + s_2^2) + s_2 (r_1 s_2 + r_2 s_1) - r_2 (s_1 s_2 - r_1 r_2)}{(r_2^2 + s_2^2)(s_1 s_2 - r_1 r_2)}$$

$$\frac{1}{x} = \frac{r_2 (r_2^2 + s_2^2) + r_1 s_2^2 + r_2 s_1 s_2 - r_2 s_1 s_2 + r_1 r_2^2}{(r_2^2 + s_2^2)(s_1 s_2 - r_1 r_2)}$$

$$\frac{1}{x} = \frac{(r_2 + r_1)(r_2^2 + s_2^2)}{(r_2^2 + s_2^2)(s_1 s_2 - r_1 r_2)}$$

$$\frac{1}{x} = \frac{r_1 + r_2}{s_1 s_2 - r_1 r_2}, \qquad x = \frac{s_1 s_2 - r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Corrientes trifásicas

I.—Circuitos montados en estrella

a) **Notaciones.**— Designemos por u_1, u_2 y u_3 los *valores instantáneos* de las *tensiones en estrella,* es decir, de las tensiones entre el centro O de la estrella

y los extremos A_1, A_2 y A_3 de las ramas de la estrella, y su valor eficaz por U.

Llamemos $u_{1.2}$, $u_{2.3}$ y $u_{3.1}$ a los valores instantáneos de las *tensiones compuestas* (entre fases unidas), es decir, de las tensiones entre los hilos de línea, o sea entre A_1 y A_2, A_2 y A_3 A_3 y A_1, y sea U' su valor eficaz.

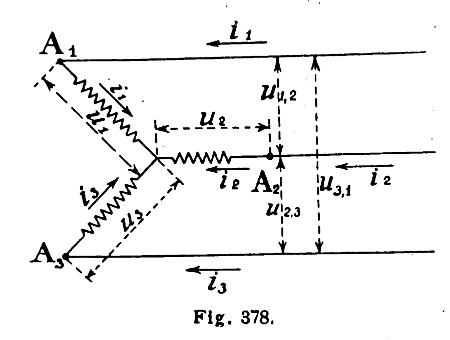


Fig. 378.

Sean, por último, i_1, i_2 e i_3 los valores instantáneos de las corrientes en los hilos de línea, y por consiguiente en los brazos de la estrella, y sea I su valor eficaz (fig. 378).

b) **Relaciones entre los valores instantáneos.**

(1) $$u_1 + u_2 + u_3 = 0$$

(2) $$u_{1.2} + u_{2.3} + u_{3.1} = 0$$

(3) $$u_{1.2} = u_1 - u_2, \quad u_{2.3} = u_2 - u_3, \quad u_{3.1} = u_3 - u_1$$

(4) $$i_1 + i_2 + i_3 = 0.$$

c) **Representación gráfica** (fig. 379). — Las tensiones en estrella están representadas por tres vectores de magnitud U, formando entre sí ángulos de 120°; sean, por ejemplo, OA_1, OA_2 y OA_3.

Las tensiones compuestas, según las relaciones (3) se obtienen sumando geométricamente u_1 y $-u_2$, u_2 y $-u_3$, u_3 y $-u_1$, resultando así los vectores OB_1, OB_2 y OB_3.

Las corrientes en las líneas y por consiguiente en las ramas de la estrella están representadas por tres vectores OC_1, OC_2 y OC_3 de magnitud I, formando res-

pectivamente con OA_1, OA_2 y OA_3 ángulos φ, siendo φ el defasaje de la corriente en cada rama de la estrella sobre la tensión en estrella correspondiente y por lo tanto cos φ es el factor de potencia de cada uno de los tres circuitos que constituyen la estrella.

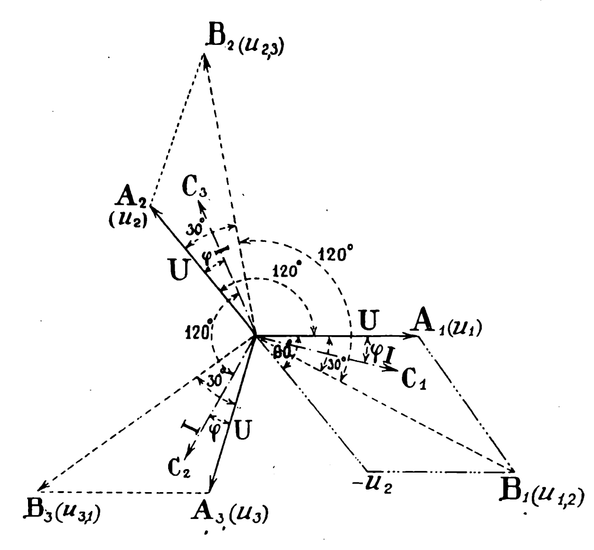


Fig. 379.

d) **Relación entre los valores eficaces de las tensiones compuestas y en estrella.** — De la construcción precedente se deduce, como ya hemos demostrado anteriormente:

$$OB_1 = OA_1 \sqrt{3},$$

luego:

$$U' = U\sqrt{3}; \qquad U' = U \times 1{,}73 \text{ (pág. 429).}$$

e) **Defasaje de las tensiones compuestas, sobre las tensiones en estrella.** — En la figura 379 se ve que el

defasaje de $u_{1\,.\,2}$ sobre u_1, de $u_{2\,.\,3}$ sobre u_2 y de $u_{3\,.\,1}$ sobre u_3 es de 30°.

f) **Defasaje de las corrientes en las líneas sobre las tensiones compuestas.**— Según la anterior construcción, ampliada en la figura 380, se ve que si la corriente en cada rama de la estrella está defasada

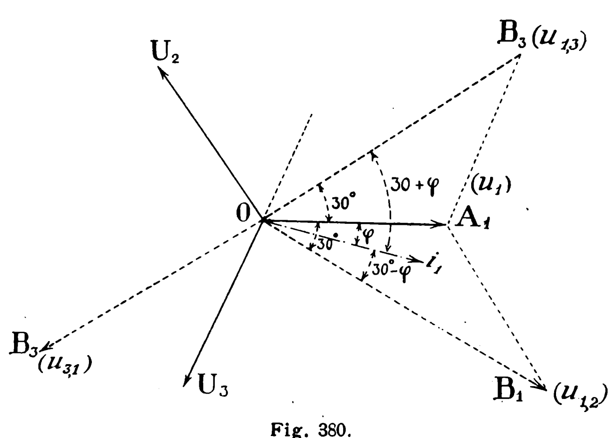


Fig. 380.

del ángulo φ en atraso respecto a la tensión en estrella correspondiente y si φ es inferior a 30°, la corriente i_1 está defasada de $30 - \varphi$ en adelanto sobre $u_{1\,.\,2}$ y de $30 + \varphi$ en atraso respecto a $u_{1\,.\,3}$ (siendo $u_{1\,.\,3}$ igual a $-u_{3\,.\,1}$, está representada por un vector de longitud igual a OB_3 y opuesto a OB_3). Análogamente:

i_2 está defasada de $(30 - \varphi)$ sobre $u_{2\,.\,3}$ y de $(30 + \varphi)$ sobre $u_{2\,.\,1}$,
i_3 está defasada de $(30 - \varphi)$ sobre $u_{3\,.\,1}$ y de $(30 + \varphi)$ sobre $u_{3\,.\,2}$.

En el caso de que φ sea mayor de 30°, se ve fácilmente que:

i_1 está defasada en atraso de $(\varphi - 30)$ sobre $u_{1.2}$ y de $(\varphi + 30)$ sobre $u_{1.3}$,
i_2 está defasada en atraso de $(\varphi - 30)$ sobre $u_{2.3}$ y de $(\varphi + 30)$ sobre $u_{2.1}$,
i_3 está defasada en atraso de $(\varphi - 30)$ sobre $u_{3.1}$ y de $(\varphi + 30)$ sobre $u_{3.2}$.

g) **Potencia.** — La potencia producida en el caso de circuitos generadores, o absorbida en el caso de circuitos receptores, tiene respectivamente por valor:

$$3\,UI \cos\varphi \text{ watts} \quad \text{y} \quad U'I\sqrt{3} \cos\varphi \text{ watts.}$$

El factor de potencia de la estrella, es decir, de cada uno de los tres circuitos que la constituyen, es cos φ.

II.—Circuitos montados en triángulo

a) **Notaciones.** — Aunque en este caso no existen circuitos en estrella, podemos, sin embargo, imaginar las tensiones en estrella, que son las que existirían

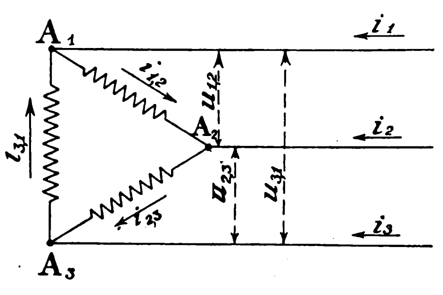


Fig. 381.

entre un punto cualquiera O y los extremos A_1, A_2 y A_3 del triángulo, si el punto O se uniera a estos tres extremos por circuitos idénticos (fig. 381).

De este modo estamos en el mismo caso que al tratar de circuitos montados en estrella y designaremos las diferentes magnitudes por las mismas letras. Pero las cantidades i_1, i_2, i_3 e I representan ahora, las tres primeras las corrientes instantáneas, y la I la corriente eficaz en los hilos de línea y no en las ramas del triángulo.

Representaremos los valores instantáneos de las corrientes en las ramas del triángulo por $i_{1 \cdot 2}$, $i_{2 \cdot 3}$, $i_{3 \cdot 1}$ y por I' su valor eficaz.

b) **Relaciones entre los valores instantáneos.** — Las relaciones (1), (2), (3) y (4) del caso anterior subsisten en éste. Además, entre los valores instantáneos de las corrientes en las líneas y en las ramas del triángulo existen las relaciones:

$$(5) \quad i_1 = i_{1 \cdot 2} - i_{3 \cdot 1}\,; \quad i_2 = i_{2 \cdot 3} - i_{1 \cdot 2}\,; \quad i_3 = i_{3 \cdot 1} - i_{2 \cdot 3}\,.$$

c) **Representación gráfica.** — Las tensiones en estrella están representadas por los tres vectores OA_1,

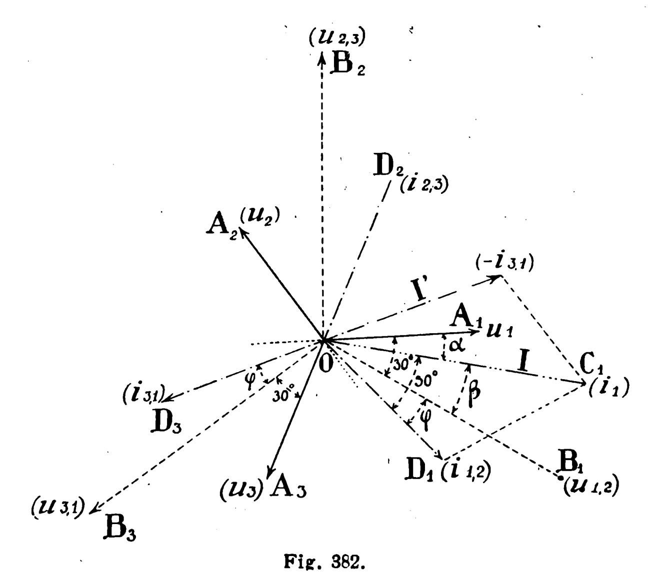


Fig. 382.

OA_2 y OA_3, de magnitud U, formando entre sí ángulos de 120° (fig. 382).

Las tensiones compuestas, representadas por los vectores OB_1, OB_2 y OB_3, se obtienen como en el caso anterior.

Las corrientes en las ramas del triángulo están representadas por tres vectores OD_1, OD_2 y OD_3 que forman, con los vectores que representan las tensiones compuestas OB_1, OB_2 y OB_3, ángulos iguales φ, siendo $\cos \varphi$ el factor de potencia de cada uno de los circuitos que constituyen el triángulo.

Las corrientes i_1, i_2, i_3 en las líneas se obtienen, según las relaciones (5), sumando geométricamente los vectores que representan $i_{1.2}$ y $- i_{3.1}$, $i_{2.3}$ y $- i_{1.2}$, $i_{3.2}$ e $i_{2.3}$. Así resultan los tres vectores OC_1, OC_2 y OC_3.

d) **Relación entre el valor eficaz I de las corrientes en las líneas y el valor eficaz I' de las corrientes en las ramas del triángulo.** — De la figura anterior se deduce, según sabemos:

$$I = I' \sqrt{3}, \quad \text{o sea} \quad I = I' \times 1{,}73 .$$

e) **Defasaje de las corrientes en las líneas sobre las tensiones en estrella.** — Este defasaje está medido por el ángulo $C_1 O A_1 = \alpha$ (fig. 382).

Designemos por β el ángulo $C_1 O B_1$; se ve que:

$$\alpha + \beta = 30^\circ$$

y

$$\varphi + \beta = 30^\circ,$$

de donde:

$$\alpha = \varphi .$$

El ángulo φ es el defasaje de la corriente en las ramas A_1, A_2 del triángulo sobre la tensión compuesta $u_{1.2}$ aplicada entre los extremos A_1 y A_2.

Por consiguiente: *El defasaje de la corriente en una línea sobre la tensión en estrella correspondiente es igual al defasaje de la corriente en una rama del triángulo sobre la tensión compuesta entre los extremos de esta rama.*

f) **Potencia.** — La potencia producida en el caso de circuitos generadores, o consumida en el caso de circuitos receptores, tiene por valor:

$$3\,UI'\cos\varphi, \qquad \text{o sea} \qquad UI\sqrt{3}\cos\varphi \text{ watts},$$

siendo cos φ el factor de potencia del triángulo, es decir, del circuito que forma cada rama.

OBSERVACIÓN. — Es evidente que todas las propiedades estudiadas en los circuitos en estrella, subsisten para los circuitos en triángulo; estas propiedades son:

Relaciones entre los valores eficaces de las tensiones en estrella y compuestas;

Defasaje de las tensiones compuestas sobre las tensiones en estrella;

Defasaje de las corrientes en las líneas sobre las tensiones compuestas.

APLICACIÓN. — I. *Se quiere alimentar con corrientes trifásicas una fábrica receptora que absorbe una potencia de* P *kilowatts bajo una tensión compuesta de* U *volts con un factor de potencia* cos φ. *La pérdida admitida en la línea es* a °/₀ *de la potencia total.*

Calcular la sección de los conductores y el peso de la línea, que suponemos de cobre, con resistividad igual a 1,8 microhms-centímetro. Calcular la caída de tensión en la línea y por consiguiente la tensión a la salida de la central generatriz.

Cualquiera que sea el montaje, en triángulo, en estrella, o en triángulo y estrella, la corriente eficaz en los hilos de línea es I amperes, dada por la relación:

$$1000\,P = UI\sqrt{3}\cos\varphi,$$

de donde:

$$I = \frac{1000\,P}{U\sqrt{3}\cos\varphi}.$$

La pérdida de potencia en las líneas es $3\,RI^2$, siendo R la resistencia de cada línea y esta pérdida es igual a:

$$\frac{a}{100} \times 1000\,P = 10\,a\,P \text{ watts,}$$

luego:

$$3\,RI^2 = 10\,aP$$

$$3\,R \times \frac{1000^2\,P^2}{3\,U^2 \cos^2\varphi} = 10\,aP,$$

de donde:

$$R = \frac{10\,aU^2 \cos^2\varphi}{1000^2\,P} \text{ ohms.}$$

Siendo la sección de la línea s milímetros cuadrados y l su longitud en metros, se tiene:

$$R = \frac{1{,}8}{100} \times \frac{l}{s}$$

y

$$\frac{1{,}8}{100} \times \frac{l}{s} = \frac{10\,aU^2 \cos^2\varphi}{1000^2\,P}$$

$$1000\,saU^2 \cos^2\varphi = 1000^2 \times 1{,}8\,Pl,$$

de donde:

$$(1) \qquad s = \frac{1000 \times 1{,}8\,Pl}{aU^2 \cos^2\varphi} \text{ milímetros cuadrados.}$$

El peso γ de la línea es, siendo 8,8 la densidad del cobre:

$$3 \times 100\,\frac{ls}{100} \times 8{,}8 \text{ gramos,} \quad \text{o sea} \quad 3\,ls \times 8{,}8 \text{ gramos,}$$

o bien:

$$\gamma = 3 \times \frac{ls \times 8{,}8}{1000} \text{ kilogramos,}$$

o sea:

$$(2) \quad \gamma = 3 \times \frac{1000 \times 1{,}8\,Pl^2 \times 8{,}8}{1000\,aU^2 \cos^2\varphi} = 3 \times \frac{1{,}8 \times 8{,}8\,Pl^2}{aU^2 \cos^2\varphi} = 3 \times \frac{15{,}84\,Pl^2}{aU^2 \cos^2\varphi} \text{ Kg.}$$

Caída de tensión en la línea.—Sea $u_{1\cdot 2}$ la tensión instantánea, a la llegada, entre las líneas 1 y 2; $u'_{1\cdot 2}$ la

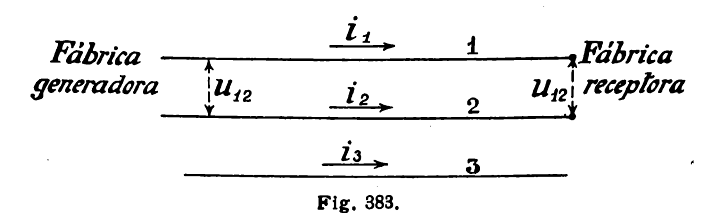


Fig. 383.

tensión instantánea a la salida (fig. 383). Aplicando la segunda ley de Kirchhoff se tiene:

$$u'_{1\cdot 2} - u_{1\cdot 2} = Ri_1 - Ri_2, \quad \text{o sea} \quad u'_{1\cdot 2} = u_{1\cdot 2} + R(i_1 - i_2).$$

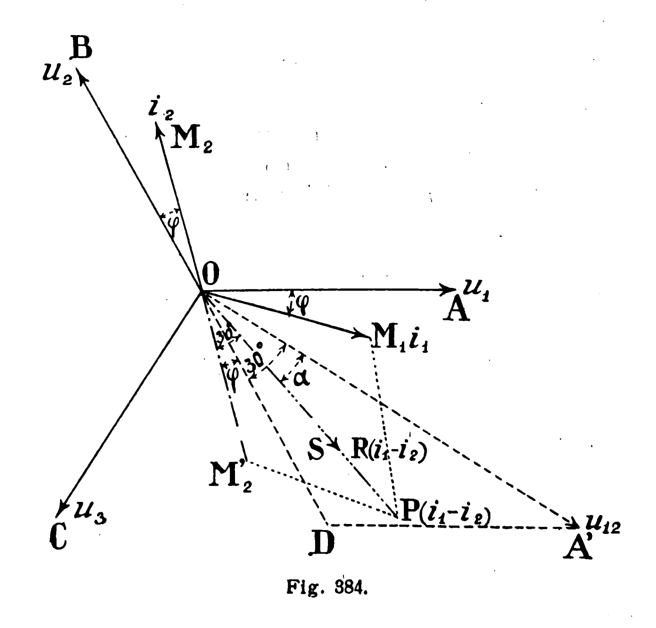


Fig. 384.

Para hallar el valor eficaz U' de $u'_{1\cdot 2}$, representaremos gráficamente cada una de las cantidades u_1, i_1 e i_2.

Para ello, sean OA, OB y OC tres vectores que representan las tensiones en estrella a la llegada: u_1, u_2 y u_3 (fig. 384). Las tensiones compuestas $u_{1.2}$, $u_{2.3}$, $u_{3.1}$ estarán representadas por tres vectores OA', OB', OC' que forman respectivamente con OA, OB y OC ángulos de 30°. Se sabe que siendo cos φ el factor de potencia de la instalación, la corriente i_1 en una línea está defasada del ángulo φ sobre la tensión en estrella correspondiente (pág. 485, *e*); por consiguiente i_1 está representada por OM_1, defasado en atraso, por ejemplo, sobre OA del ángulo φ, e i_2 por el vector OM_2, defasado también en atraso sobre OB, del mismo ángulo φ. OM'_2 igual y opuesto a OM_2 representa $-i_2$ y la resultante OP de OM_1 y OM'_2 representa $i_1 - i_2$. Además, $R(i_1 - i_2)$ está en fase con $i_1 - i_2$ (admitiendo que la línea no tiene auto-inducción ni capacidad); luego esta cantidad está representada por un vector OS de la misma dirección que OP.

Por consiguiente, $R(i_1 - i_2)$ está defasada sobre $u_{1.2}$ del ángulo α. Se ve fácilmente en la figura 384, que:

$$\widehat{DOP} = 30 - \varphi$$

y

$$\widehat{DOP} = 30 - \alpha,$$

luego:

$$\alpha = \varphi.$$

Además, el valor eficaz de $i_1 - i_2$ medido por el vector OP, resultante de los dos vectores OM_1 y OM'_2 de valor I y formando entre sí un ángulo de 30°, es, como ya sabemos:

$$I\sqrt{3} \quad \text{y} \quad OS = RI\sqrt{3}.$$

Es decir, que la tensión U' a la salida de la central generadora está medida por un vector OT (fig. 385),

resultante de OA' (que mide la tensión a la llegada) y de OS (de valor $RI\sqrt{3}$) que forma con OA' el ángulo dado φ.

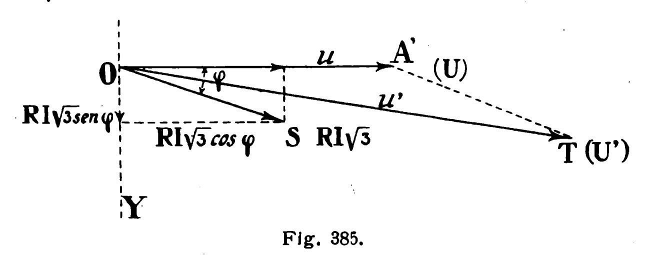


Fig. 385.

La proyección de OT sobre OA' es la suma de las proyecciones de OA' y de OS, es decir:

$$U + RI\sqrt{3}\cos\varphi.$$

La proyección de OT sobre una perpendicular OY a OA' es igual a la proyección de OS, es decir, $RI\sqrt{3}\operatorname{sen}\varphi$, y OT es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las dos proyecciones, luego:

$$U'^2 = (U + RI\sqrt{3}\cos\varphi)^2 + 3R^2I^2\operatorname{sen}^2\varphi$$
$$U'^2 = U^2 + 3R^2I^2\cos^2\varphi + 2URI\sqrt{3}\cos\varphi + 3R^2I^2\operatorname{sen}^2\varphi$$
$$U'^2 = U^2 + 2URI\sqrt{3}\cos\varphi + 3R^2I^2(\operatorname{sen}^2\varphi + \cos^2\varphi)$$
$$U'^2 = U^2 + 3R^2I^2 + 2URI\sqrt{3}\cos\varphi.$$

Todas las cantidades del segundo miembro son conocidas, luego ya se puede calcular la tensión U' a la salida y por consiguiente la caída de tensión $U' - U$.

Si el circuito receptor no fuera inductivo se tendría $\cos\varphi = 1$, y:

$$U'^2 = U^2 + 3R^2I^2 - 2URI\sqrt{3}$$
$$U'^2 = (U + RI\sqrt{3})^2$$
$$U' = U + RI\sqrt{3}.$$

La caída de tensión es:

$$U' - U = RI\sqrt{3}.$$

EJEMPLO. — La energía utilizada en un taller es suministrada por un generador trifásico. La instalación comprende (fig. 386):

1.° Varias lámparas de incandescencia agrupadas en triángulo, que absorben una potencia de 3 kilowatts con un factor de potencia igual a la unidad;

2.° Un motor trifásico, en estrella, de 10 caballos, cuyo factor de potencia es igual a 0,8. La tensión eficaz entre los conductores sobre los cuales están derivadas las lámparas y entre los bornes del motor es de 220 volts. Se quiere determinar el valor eficaz de la corriente en el hilo de línea y el factor de potencia de la instalación.

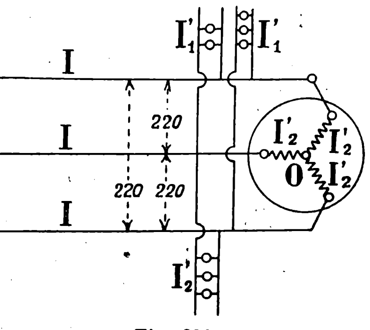


Fig. 386.

Sea I'_1 la corriente en cada uno de los tres grupos de lámparas; la potencia necesaria para el alumbrado es:

$$3 \times 220 \times I'_1 \cos\varphi,$$

o sea:

$$W_1 = 3 \times 220 \times I'_1,$$

por ser:

$$\cos\varphi = 1.$$

Hemos visto que el valor eficaz de la corriente en

los hilos de línea y que alimenta los tres circuitos de lámparas es:

$$I_1 = I'_1 \sqrt{3}, \qquad \text{de donde:} \qquad I'_1 = \frac{I_1}{\sqrt{3}}$$

y

$$W_1 = 3 \times 220 \times \frac{I_1}{\sqrt{3}} = 220 \times I_1 \times \sqrt{3};$$

esta potencia es de 3 kilowatts, o sea de 3000 watts, luego:

$$3000 = 220 \times I_1 \times \sqrt{3},$$

de donde:

$$I_1 = \frac{3000}{220 \times 1{,}732} = 7{,}8 \text{ amperes.}$$

Sea I'_2 la corriente en cada uno de los tres devanados del motor; la corriente en los hilos de línea y que alimenta este motor es la misma que en los devanados:

$$I_2 = I'_2 .$$

La tensión entre el centro O de la estrella y cada uno de los bornes es $\frac{220}{\sqrt{3}}$, luego la potencia tomada por el motor es:

$$3 \times \frac{220}{\sqrt{3}} \times I_2 \times \cos\varphi = 220 \times \sqrt{3} \times I_2 \times 0{,}8;$$

ahora bien, esta potencia es de 10 caballos, que son 7360 watts, luego:

$$7360 = 220 \times 1{,}732 \times I_2 \times 0{,}8;$$

de donde:

$$I_2 = \frac{7360}{220 \times 1{,}732 \times 0{,}8} = 24{,}1 \text{ amperes.}$$

La corriente total en los hilos de línea tiene por valor la resultante de las dos corrientes I_1 e I_2. La primera I_1 está en concordancia de fase con la tensión, la segunda I_2 está defasada en atraso sobre esta tensión del ángulo φ, tal que $\cos \varphi = 0{,}8$.

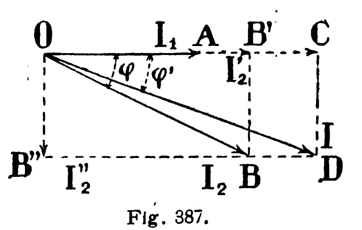


Fig. 387.

Estas dos corrientes están por consiguiente representadas por los vectores OA y OB (fig. 387). La componente wattada de I_2 está representada por OB' y tiene por valor:

$$I'_2 = I_2 \cos \varphi,$$

o bien:

$$I'_2 = 24{,}1 \times 0{,}8 = 19{,}28.$$

La componente dewattada está representada por OB'' y tiene por valor:

$$I''_2 = I_2 \operatorname{sen} \varphi\,;$$

ahora bien:

$$\cos \varphi = 0{,}8 \quad \text{y} \quad \operatorname{sen}^2 \varphi = 1 - \cos^2 \varphi\,,$$
$$\operatorname{sen}^2 \varphi = 1 - 0{,}64 = 0{,}36,$$
$$\operatorname{sen} \varphi = 0{,}6,$$

luego:

$$I''_2 = 24{,}1 \times 0{,}6 = 14{,}46.$$

La resultante de los dos vectores I_1 e I'_2 es igual a su suma, representada por OC:

$$I_1 + I'_2 = 7{,}8 + 19{,}28 = 27{,}08.$$

Para tener el valor de la corriente I, bastará componer OC y OB''; así resulta el vector OD, que mide I. Se ve que:

$$OD^2 = OC^2 + CD^2,$$

o bien:

$$OD^2 = OC^2 + OB''^2;$$

luego:

$$I^2 = \overline{27,08}^2 + \overline{14,46}^2 = 942,42$$

$$I = \sqrt{942,42} = 30,7 \text{ amperes.}$$

Esta corriente total está defasada sobre la tensión del ángulo φ'. En el triángulo rectángulo ODC se tiene:

$$OC = OD \cos \varphi',$$

o bien:

$$27,08 = 30,7 \cos \varphi';$$

de donde:

$$\cos \varphi' = \frac{27,08}{30,7} = 0,85;$$

que es el factor de potencia de la instalación.

¿Cuál debe ser la sección de los conductores para que la pérdida en la línea sea igual al 10 °/₀ de la potencia total, sabiendo que la distancia a la central generatriz es de 200 metros?

Basta sustituir en la fórmula (1) (pág. 487), a por 10, l por 200, P por $3 + 7,36 = 10,36$, cos φ por 0,85 y U por 220. Se tiene entonces:

$$s = \frac{1000 \times 1,8 \times 10,36 \times 200}{10 \times 220^2 \times 0,85^2} = 10,7 \text{ milímetros cuadrados.}$$

El peso del cobre será [fórmula (2), pág. 487]:

$$\gamma = \frac{3 \times 15,84 \times 10,36 \times 200^2}{10 \times 220^2 \times 0,85^2} = 56 \text{ kilogramos.}$$

La tensión a la salida debe ser U' (pág. 490), tal que:

$$U'^2 = 220^2 + 3\,R^2 \times 30,7^2 + 2 \times 220 \times R \times 30,7 \sqrt{3} \times 0,85.$$

La resistencia R está dada por la igualdad:

$$R = \frac{10 \times 10 \times 220^2 \times 0,85^2}{1\,000^2 \times 10,65} = 0,327 \text{ ohms.}$$

Por consiguiente:

$$U'^2 = 220^2 + 3 \times 0,327^2 \times 30,7^2 + 2 \times 220 \times 0,327 \times 1,73 \times 0,85$$

$$U' = 227 \text{ volts.}$$

Caída de tensión: 227 — 220 = 7 volts.

APLICACIÓN. — II. *Para determinar el defasaje producido por un motor alimentado por corrientes trifásicas se disponen sobre las líneas dos contadores como indica la figura 388. Los hilos gruesos de los dos contadores están sobre la misma línea* I *y el hilo*

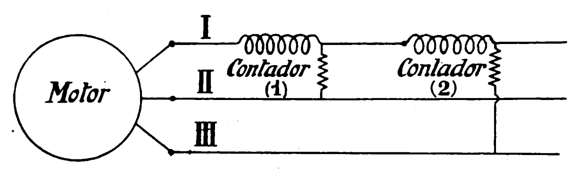


Fig. 388.

fino de uno de ellos está derivado entre las líneas I *y* II, *mientras que el del otro lo está entre las líneas* I *y* III. *Después de algún tiempo de estar funcionando, el primer contador indica un consumo de 925 watt-horas, el segundo un consumo de 525 watt-horas. Deducir de estos dos números el factor de potencia del motor.*

Sea U la tensión compuesta, entre línea, I la corriente en cada línea; siendo φ el defasaje de las corrientes sobre la tensión en estrella, la corriente en la línea I está defasada sobre la tensión entre I y II de $30 - \varphi$, y el primer contador después de t horas de

funcionamiento indica $UI \cos(30 - \varphi) \times t$ watt-horas, por consiguiente:

$$(1) \qquad UIt \cos(30 - \varphi) = 925.$$

La corriente en la línea I está defasada de $30 + \varphi$ sobre la tensión en I y III, de modo que el segundo contador al cabo del mismo tiempo t horas, indica $UI \cos(30 + \varphi) \times t$ watt-horas, y se tiene:

$$(2) \qquad UIt \cos(30 + \varphi) = 525.$$

Dividiendo ordenadamente las igualdades (1) y (2) se tiene:

$$\frac{\cos(30 - \varphi)}{\cos(30 + \varphi)} = \frac{925}{525},$$

o sea (pág. 373):

$$\frac{\cos 30 \cos\varphi + \operatorname{sen} 30 \operatorname{sen}\varphi}{\cos 30 \cos\varphi - \operatorname{sen} 30 \operatorname{sen}\varphi} = \frac{925}{525}.$$

de donde:

$$\frac{\cos 30 \cos\varphi + \operatorname{sen} 30 \operatorname{sen}\varphi + \cos 30 \cos\varphi - \operatorname{sen} 30 \operatorname{sen}\varphi}{\cos 30 \cos\varphi + \operatorname{sen} 30 \operatorname{sen}\varphi - (\cos 30 \cos\varphi - \operatorname{sen} 30 \operatorname{sen}\varphi)} =$$

$$= \frac{925 + 525}{925 - 525}.$$

Es decir:

$$\frac{2 \cos 30 \cos\varphi}{2 \operatorname{sen} 30 \operatorname{sen}\varphi} = \frac{1450}{400} = \frac{29}{8},$$

o sea:

$$\frac{\sqrt{3} \cos\varphi}{\operatorname{sen}\varphi} = \frac{29}{8}, \qquad \frac{\sqrt{3}}{\operatorname{tg}\varphi} = \frac{29}{8}, \qquad \operatorname{tg}\varphi = \frac{8}{29}\sqrt{3} = 0{,}477.$$

Por consiguiente:

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0{,}477^2}} = 0{,}90.$$

CAPÍTULO XIX

Transformadores

Un transformador es una máquina que tiene por objeto transformar los factores (tensión e intensidad) de la potencia dada por una corriente alterna sin modificar sensiblemente el valor de esta potencia.

Un transformador estático se compone de un núcleo de hierro dulce laminado, a cuyo alrededor hay dos devanados independientes entre sí; el primero recibe la potencia bajo su forma primitiva, y se llama *circuito primario;* el segundo transforma esta potencia y la comunica a un circuito de utilización, y se llama *circuito secundario* (fig. 389).

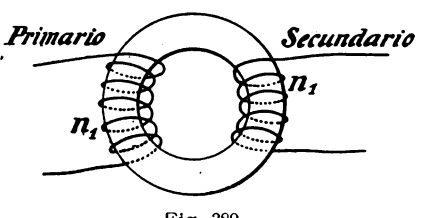


Fig. 389.

Si en los extremos del circuito primario se aplica una d. d. p. alterna, resulta en este circuito una corriente alterna: esta corriente da lugar en el núcleo a un flujo alterno de la misma frecuencia. Bajo la influencia de este flujo alterno se produce en las espiras del circuito secundario una f. e. m. alterna de inducción de la misma frecuencia que la aplicada en los extremos del primario. Cuando los bornes del

secundario están unidos a un circuito de utilización, se produce en este circuito una corriente.

Sean E_1 e I_1 la tensión y la corriente eficaces de la potencia primaria, y determinemos los valores eficaces de la tensión y la corriente dados por el secundario.

La determinación de las condiciones de funcionamiento de una de estas máquinas es un problema complejo y difícil de resolver. Pero podemos simplificarlo admitiendo que el flujo resultante producido por las corrientes primarias y secundarias es el mismo a través de las espiras de estos dos circuitos; que la permeabilidad del núcleo es constante; que los efectos de la histeresis y las corrientes de Foucault en el hierro son despreciables, y por último que las pérdidas de potencia por efecto Joule en estos dos circuitos son también despreciables.

Sea Φ el valor máximo del flujo resultante en el núcleo: la d. d. p. aplicada está en cada instante equilibrada por la f. e. m. inducida en las espiras del primario, despreciando la caída óhmica en este circuito. Ahora bien, durante un semiperíodo $\frac{T}{2}$, el flujo varía de $+\Phi$ a $-\Phi$, es decir, sufre una variación 2Φ; la f. e. m. media inducida en una espira tiene por consiguiente el valor $\frac{2\Phi}{\frac{T}{2}\times 10^8}$; siendo N la frecuencia, se tiene:

$$T=\frac{1}{N},$$

y el valor de esta f. e. m. puede escribirse: $\frac{4N\Phi}{10^8}$.

Sea n_1 el número de espiras del primario; la f. e. m. inducida entre los extremos de este circuito es:

$$E_1\ med=\frac{4N\Phi}{10^8}\times n_1;$$

el valor eficaz es:

$$(1) \qquad E_1 = \frac{4 N \Phi n_1}{10^8} \times \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = \frac{\pi 2 N \Phi n_1}{10^8 \sqrt{2}}.$$

Por consiguiente, según lo que hemos dicho, este valor representa la d. d. p. eficaz aplicada a los bornes del circuito primario.

Las espiras del circuito secundario son atravesadas por el mismo flujo, y por consiguiente, si n_2 es el número de espiras de este secundario, la f. e. m. inducida entre los extremos tendrá por valor:

$$(2) \qquad E_2 = \frac{2 \pi N \Phi n_2}{10^8 \sqrt{2}}.$$

Ahora bien, como se supone despreciable la caída de tensión en el circuito, este valor es también el valor de la d. d. p. en los bornes del secundario.

Dividiendo (1) por (2) ordenadamente, se tiene:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Esta relación se llama *relación de transformación.*

Además, si I_1 es la corriente que circula por el circuito primario, e I_2 la que circula por el circuito secundario, se demuestra que:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

es decir, que la relación entre las corrientes primaria y secundaria es igual a la inversa de la relación de transformación. Luego se puede escribir:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1},$$

de donde:

$$E_1 \times I_1 = E_2 \times I_2.$$

Empleo de los transformadores. — Supongamos que haya que transportar a gran distancia una potencia eléctrica de 200 caballos. Sea, por ejemplo, 500 volts la tensión en el punto de partida; la intensidad de la corriente en la línea tiene un valor I tal, que:

$$200 \times 736 = 500 \times I,$$

de donde:

$$I = \frac{200 \times 736}{500} = 292 \text{ amperes.}$$

Si R es la resistencia de la línea, la potencia perdida en esta línea es $(R \times 292^2)$ watts, o sea $(R \times 85)$ kilowatts aproximadamente.

Si se quiere reducir esta pérdida, habrá que disminuir la resistencia R y por consiguiente utilizar un cable de mayor sección. Así puede suceder que haya que emplear cables de tales secciones, que el precio de la línea sea excesivo para una pérdida razonable de potencia.

Supongamos que para transportar esta potencia de 200 caballos, se tenga en el origen una tensión de 10000 volts; la corriente tendrá un valor I' que cumplirá con la siguiente condición:

$$200 \times 736 = 10000\, I',$$

de donde:

$$I' = \frac{200 \times 736}{10000} = 15,7 \text{ amperes.}$$

Para una misma resistencia de línea R, la pérdida de potencia sólo será de $(R \times 15,7^2)$ watts, o sea de $(R \times 0,25)$ kilowatts aproximadamente.

Si se quiere tener la misma pérdida que en el caso anterior, se puede tomar R más grande, es decir, emplear un cable de sección mucho menor, lo cual reduce considerablemente el precio de la instalación.

Se ve, pues, la importancia que tiene el producir en la central de origen una tensión muy elevada. Pero, por otra parte, hay grandes dificultades en construir generadores que den altas tensiones, y los aparatos de utilización no pueden en general emplearse con estos voltajes.

Los transformadores permiten salvar todos estos inconvenientes y mediante su empleo puede transportarse la energía en las mejores condiciones económicas.

Una central de origen comprenderá generadores alternos que den entre sus anillos una tensión de

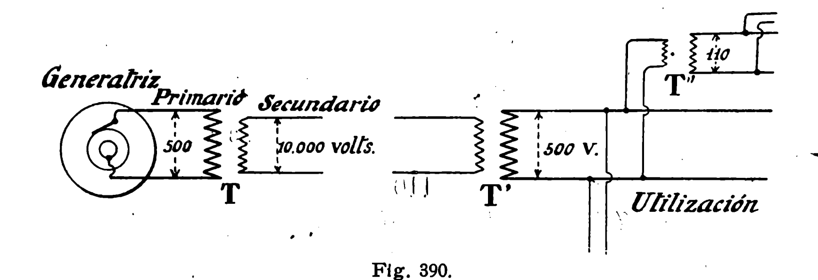


Fig. 390.

500 volts, por ejemplo (fig. 390). Estos generadores estarán unidos al circuito primario de un transformador *T* cuyo secundario tiene, por ejemplo, 20 veces más espiras que el primario. El voltaje en los bornes del secundario será, por lo tanto:

$$500 \times 20 = 10000 \text{ volts.}$$

Los hilos de línea están unidos a los bornes de este circuito secundario.

En vez de terminar las líneas en un circuito de utilización, van a parar a los bornes del circuito primario de un transformador *T'* que tiene 20 veces más espiras

que el secundario. El voltaje en los bornes de este secundario será:

$$\frac{10000}{20}=500 \text{ volts.}$$

De estos bornes parten los conductores que alimentan los aparatos de utilización. La tensión podrá

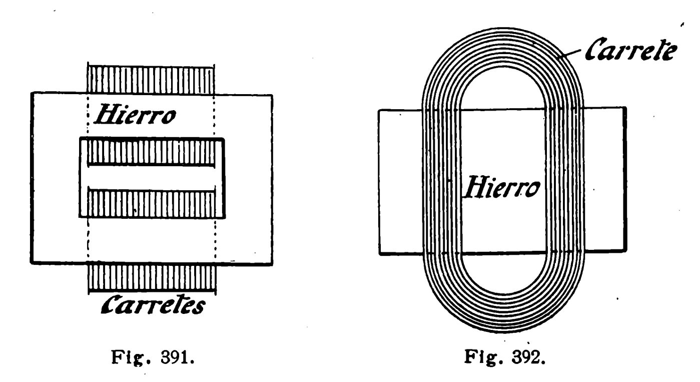
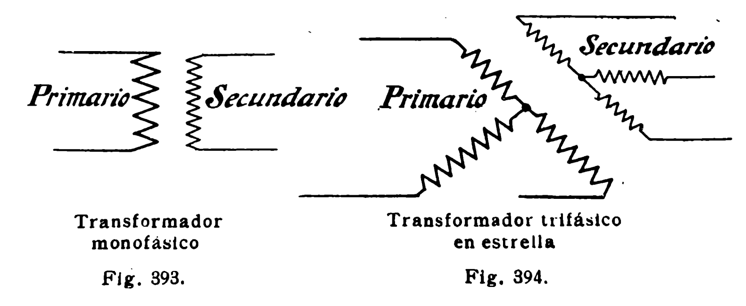


Fig. 391. Fig. 392.

aún hacerse bajar hasta 110 volts, mediante transformadores T'' instalados en diferentes puntos, por ejemplo, a la entrada en las casas de los abonados.



Transformador monofásico

Fig. 393.

Transformador trifásico en estrella

Fig. 394.

Clases de transformadores.— El circuito magnético sobre el cual están arrollados los circuitos primario y secundario está constituído por láminas delgadas de hierro, aisladas unas de otras por un barniz especial.

El transformador se llama de *núcleo* cuando las espiras de los carretes rodean al hierro (fig. 391) y de *coraza* cuando el hierro rodea también a los carretes (figura 392).

En el caso de distribuciones trifásicas, se puede utilizar un transformador por fase, o bien reunir los tres grupos de carretes primarios y secundarios sobre un mismo sistema de núcleos magnéticos; así se tienen doce extremos libres, y se pueden entonces agrupar los tres circuitos secundarios y primarios, ya sea en triángulo o en estrella.

Se representan esquemáticamente los transformadores, del modo indicado por las figuras 393 y 394.

CAPÍTULO XX

Campo giratorio

Un medio sencillo de producir un campo giratorio constante en magnitud, consiste en hacer girar un imán o un electroimán alrededor de un eje perpendicular al plano de las líneas de fuerza del campo creado (figura 395).

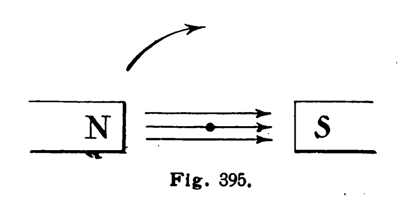
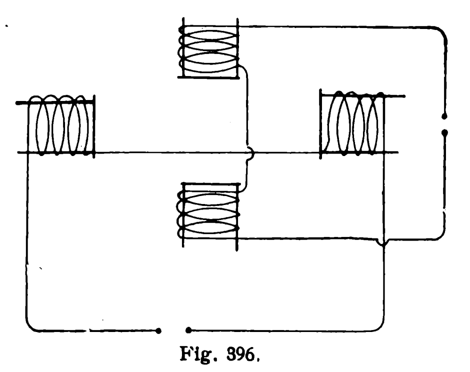


Fig. 395.

Se puede conseguir el mismo resultado por medio de circuitos fijos recorridos por corrientes alternas convenientemente defasadas unas sobre otras.


Fig. 396.

Supongamos, por ejemplo, dos sistemas de electroimanes cuyos ejes sean perpendiculares y cuyos circuitos estén recorridos por corrientes bifásicas, es decir, defasadas de 90° una sobre otra (fig. 396).

Estando inmóviles estos electroimanes, los campos que crean son constantes en dirección, perpendiculares entre sí, alternos del mismo período y defasados de 90°.

En la región comprendida entre estos electroimanes, se producirá un campo variable que será en cada instante, en magnitud y dirección, la resultante de estos dos campos.

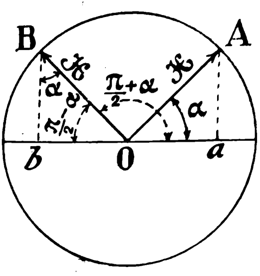


Fig. 397.

Sea $\mathcal{H}$ el valor máximo de cada uno de ellos. En un instante t, la fase del primero será α y la fase del segundo, $\frac{\pi}{2} + \alpha$ (fig. 397); el valor del primer campo en este instante es:

$$Oa = OA \cos \alpha,$$

o sea:

$$\mathcal{H} \cos \alpha;$$

el valor del segundo campo es:

$$Ob = OB \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right),$$

o sea:

$$\mathcal{H} \operatorname{sen} \alpha.$$

Fig. 398.

Por consiguiente, en el instante considerado, estos dos campos son perpendiculares entre sí (fig. 398) y tienen por valor:

$$OM = \mathcal{H} \cos \alpha$$

y

$$ON = \mathcal{H} \operatorname{sen} \alpha.$$

Su resultante es la diagonal OP, cuyo valor es:

$$OP = \sqrt{\overline{OM}^2 + \overline{ON}^2} = \sqrt{\mathcal{H}^2 \cos^2 \alpha + \mathcal{H}^2 \operatorname{sen}^2 \alpha} =$$
$$= \sqrt{\mathcal{H}^2 (\cos^2 \alpha + \operatorname{sen}^2 \alpha)} = \mathcal{H}.$$

Es decir, que el campo resultante tiene un valor constante (independiente del tiempo) igual al valor máximo común de los dos campos componentes.

Este campo gira de modo que describe un ángulo de 360°, es decir, una revolución completa, durante un tiempo igual al período de las corrientes que alimentan los dos circuitos. En efecto, sea β el ángulo que forma en el instante t el campo resultante con el campo de dirección OM; se tiene:

$$OM = OP \cos \beta, \quad \text{o sea} \quad OM = \mathcal{H} \cos \beta;$$

ahora bien:

$$OM = \mathcal{H} \cos \alpha,$$

luego:

$$\mathcal{H} \cos \alpha = \mathcal{H} \cos \beta, \quad \text{o sea} \quad \alpha = \beta.$$

Por consiguiente, el ángulo que forma el campo resultante con la dirección fija de uno de los componentes es constantemente igual a la fase de este campo: luego describe un ángulo de 360° por período.

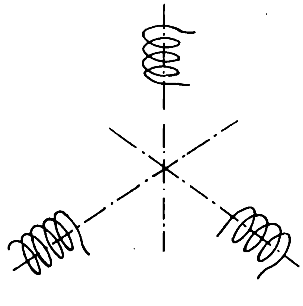


Fig. 399.

Sean ahora tres circuitos cuyos ejes forman entre sí ángulos de 120° y alimentados respectivamente por tres corrientes trifásicas (figura 399); se demuestra que se produce un campo resultante, constante en magnitud y que gira con una velo-

cidad igual a la frecuencia de las corrientes trifásicas, siendo el valor de este campo igual a una vez y media el valor má-

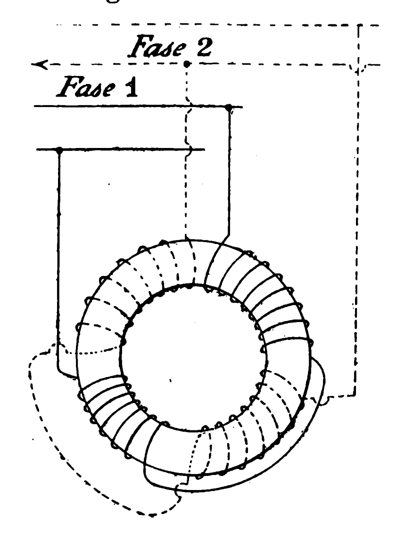


Fig. 400. — Campo giratorio producido por dos devanados bifásicos.

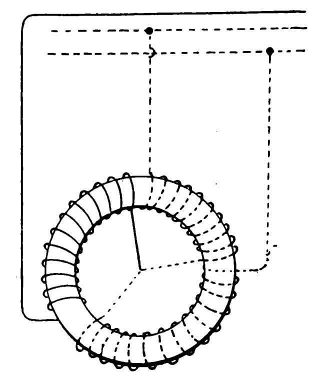


Fig. 401. — Campo giratorio producido por tres devanados trifásicos en estrella.

ximo de cada uno de los tres campos componentes.

Los esquemas de las figuras 400, 401 y 402 representan los devanados bifásicos y trifásicos que producen un campo giratorio constante en magnitud.

Disponiendo convenientemente varios grupos de carretes, se obtienen campos giratorios multipolares. El esquema de la figura 403 representa un devanado trifásico que produce un campo giratorio con cuatro polos: cada fase tiene cuatro carretes. Los grupos de carretes a_1, b_1, c_1; a_2, b_2, c_2;

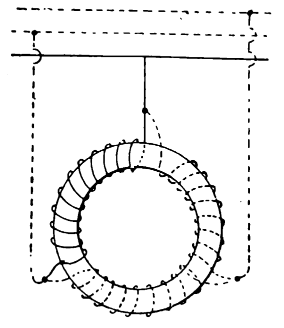


Fig. 402. — Campo giratorio producido por tres devanados trifásicos en triángulo.

a_3, b_3, c_3 y a_4, b_4, c_4, forman los cuatro campos gira-

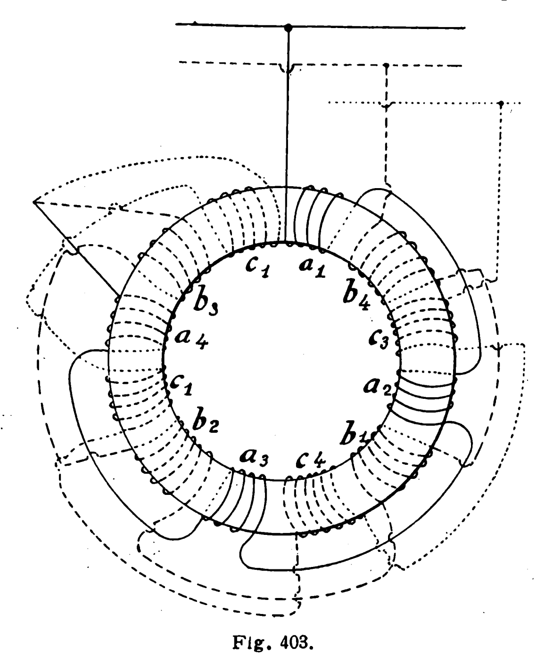


Fig. 403.

torios. Se obtendría un campo giratorio con seis polos, mediante un devanado semejante que tuviera seis carretes por fase, o sea dieciocho carretes.

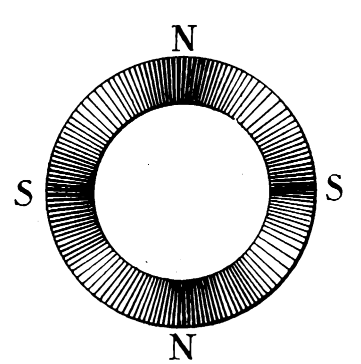


Fig. 404. — Campo giratorio con cuatro polos en un determinado instante.

En este caso, la velocidad de rotación del campo es menor para una misma frecuencia de la corriente, cuando es multipolar que cuando es bipolar, porque durante un período el campo gira del ángulo comprendido entre dos polos

consecutivos del mismo nombre. Si N es la frecuencia de la corriente, la velocidad de un campo bipolar es N vueltas por segundo, mientras que la de un campo con cuatro polos es $\frac{N}{2}$, con seis polos $\frac{N}{3}$, y en general, con $2p$ polos, $\frac{N}{p}$.

CAPÍTULO XXI

Alterno-motores

Se pueden dividir en dos grupos:

1.° Los motores *sincrónicos,* en que la velocidad es constante, cualquiera que sea la carga. Esta velocidad depende de la frecuencia de la corriente que los alimenta;

2.° Los motores *asincrónicos,* en que la velocidad puede sufrir variaciones al mismo tiempo que la carga.

Se pueden también clasificar según la naturaleza de su campo inductor:

1.° Motores de *campo constante;* su campo inductor es constante en magnitud y dirección; en esta clase, sólo hay motores sincrónicos;

2.° Motores de *campo giratorio;* su campo inductor es constante en magnitud y gira con una velocidad constante; en esta clase de motores hay motores sincrónicos y motores asincrónicos, pero sólo se utilizan los motores asincrónicos;

3.° Motores de *campo alterno;* el campo es constante en dirección y variable en magnitud; en esta clase hay motores sincrónicos y asincrónicos, pero solamente se utilizan los motores sincrónicos.

Motores sincrónicos de campo constante o de corriente alterna sencilla.— Están constituídos por un

campo inductor constante producido por electroimanes alimentados por una corriente alterna; se ve fácilmente que estas máquinas no son más que alternadores invertidos.

Consideremos por ejemplo una armazón bipolar, y como en el caso de una máquina de corriente continua, supongamos una espira alrededor de un anillo (fig. 405). Sabemos que si esta espira es recorrida por una corriente, queda sometida a una fuerza que tiende a moverla en un sentido o en otro hacia la posición (1) o hacia la posición (2), según el sentido de la corriente.

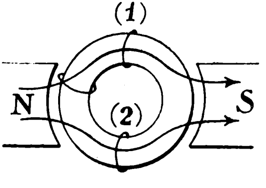


Fig. 405.

Si esta espira es recorrida por una corriente alterna, tiende a moverse en un sentido durante un semiperíodo y en sentido contrario durante el semiperíodo siguiente. Si la frecuencia es bastante grande (40 a 60 períodos por segundo) y si la inercia de la parte móvil es suficiente, la corriente se invierte antes de empezar el movimiento, y la espira permanece inmóvil.

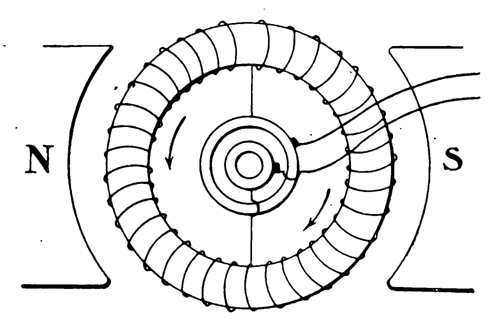


Fig. 406.

Supongamos que movemos la espira con una velocidad tal que la corriente que la recorre se invierte al pasar por (1) y por (2) y que la duración del movimiento de (2) a (1) o de (1) a (2) sea igual a un semiperíodo; en estas condiciones, es fácil ver que la fuerza que se ejerce sobre la espira tenderá a conservar su movimiento y que ésta seguirá moviéndose con una velocidad constante igual a una vuelta por período de corriente.

Si el anillo está completamente devanado (fig. 406) y se hace mover en las mismas condiciones que hemos supuesto para la espira, se ve que en un cierto instante las espiras situadas a la izquierda de la línea perpendicular a la línea de los polos son recorridas por una corriente que tiende a moverlas todas en un determinado sentido; las espiras situadas a la derecha son recorridas en el mismo instante por una corriente de signo contrario, que tiende a moverlas en el mismo sentido que las anteriores.

Estas acciones se producen durante todo el tiempo que la corriente conserva el mismo sentido, es decir, durante un semiperíodo. En este momento las espiras de la derecha ocupan el lugar de las espiras de la izquierda; pero, en este mismo momento, la corriente se invierte, de modo que las acciones que se ejercen producen un movimiento del mismo sentido.

De esta manera se sostiene el movimiento de un modo continuo.

La velocidad a que tendrá que empezarse a mover la máquina, velocidad que se conservará constante, será tal que la duración de una vuelta sea la de un período. En una máquina con $2p$ polos, será necesario que el tiempo que emplea una espira en pasar de un polo al siguiente sea igual a un semiperíodo.

Si N es el número de vueltas por segundo, la dura-

ción de una vuelta es $\frac{1}{N}$ y la duración del paso de un polo al siguiente es $\frac{1}{2pN}$.

Esta duración ha de ser igual a un semiperíodo, de modo que si T es el período de la corriente se debe tener:

$$\frac{T}{2}=\frac{1}{2pN},$$

y si n es la frecuencia de la corriente:

$$\frac{1}{2n}=\frac{1}{2pN},$$

de donde:

$$N=\frac{n}{p}.$$

Se ve que la velocidad N del motor no depende más que de la frecuencia n de la corriente y es tanto menor cuanto mayor es el número de polos inductores.

Si ω es la pulsación de la corriente, se tiene:

$$\omega=2\pi n, \qquad \text{de donde} \qquad n=\frac{\omega}{2\pi};$$

siendo ω_1 la velocidad angular del motor, se tendrá:

$$\omega_1=2\pi N, \qquad \text{de donde} \qquad N=\frac{\omega_1}{2\pi},$$

porque, en efecto, por cada vuelta gira el motor del ángulo 2π, y como en un segundo da N vueltas, girará por segundo del ángulo $2\pi N$.

Por consiguiente:

$$\frac{\omega_1}{2\pi}=\frac{\frac{\omega}{2\pi}}{p}, \qquad \text{es decir,} \qquad \omega_1=\frac{\omega}{p}.$$

Si por una razón cualquiera, un aumento del par resistente, por ejemplo, la velocidad disminuye, la corriente se invertirá demasiado pronto en las espiras, y se originará un par motor de sentido contrario al movimiento; una vez iniciada la disminución de velocidad, continúa acentuándose hasta llegar al paro completo de la máquina, produciéndose por consiguiente un corto-circuito.

Es decir, que un motor sincrónico de campo constante no es más que un alternador invertido y está caracterizado por las propiedades siguientes:

1.ª Imposibilidad de arrancar por sí solo, aun trabajando de vacío; es preciso darle una velocidad inicial conveniente *(velocidad del sincronismo);*

2.ª Velocidad rigurosamente constante, dada por la relación:

$$\text{número de vueltas por segundo} = \frac{\text{frecuencia}}{\text{número de pares de polos}}$$

Esta propiedad es la que ha dado a estos motores el nombre de «sincrónicos»;

3.ª Si la carga aumenta, la velocidad no varía; pero si pasa de un cierto valor, el motor se para y no puede volver a tomar su velocidad, aunque se disminuya la carga; se dice que el motor está en su punto crítico, o fuera de fase.

Arranque. — Para hacer arrancar un motor de esta clase, es preciso por consiguiente comunicarle la velocidad del sincronismo, lo cual se consigue por medio de un pequeño motor sincrónico, o por medio de la excitatriz, si se dispone de un generador de corriente continua, de una batería de acumuladores, por ejemplo.

En este caso, se hace girar la excitatriz como motor.

Indicador de sincronismo. — Antes de hacer pasar la corriente por el motor, es preciso asegurarse que ha alcanzado la velocidad del sincronismo. Para ello se unen las escobillas al generador de corriente por medio de una o varias lámparas en serie (fig. 407). Se abre el interruptor *I*, se excita el motor y se le hace girar; las lámparas están entonces sometidas a una tensión resultante producida por el voltaje desarrollado por el motor, que obra entonces como generador, y por el voltaje entre los hilos de línea. La frecuencia del

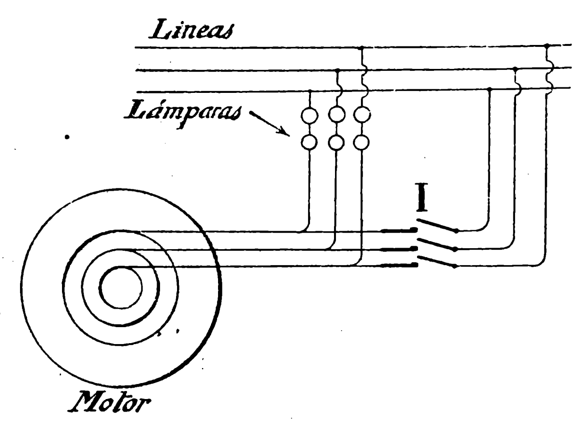


Fig. 407.

voltaje desarrollado por la máquina es diferente de la del generador, de modo que estas dos tensiones están ora en fase, ora en oposición, lo cual se traduce en *oscilaciones* en las lámparas, es decir, en encenderse y apagarse sucesivamente. A medida que la velocidad del motor se acerca a la del sincronismo, las oscilaciones se hacen cada vez más lentas: se aprovecha el momento en que las lámparas están apagadas, que corresponde a la concordancia de fase entre el generador y la máquina, para cerrar

el interruptor I. Se suprime el motor auxiliar y se carga a continuación progresivamente el motor sincrónico.

Motores sincrónicos de corrientes polifásicas.— Están construídos como los alternadores de corrientes polifásicas.

Un circuito inductor es alimentado por una corriente continua, y un circuito inducido, por corrientes polifásicas.

Se sabe que estas últimas dan lugar a varios campos giratorios.

Supongamos, para mayor simplificación, que el sistema inductor sea móvil y reducido a dos polos, y que las corrientes polifásicas sólo produzcan un campo giratorio (fig. 408).

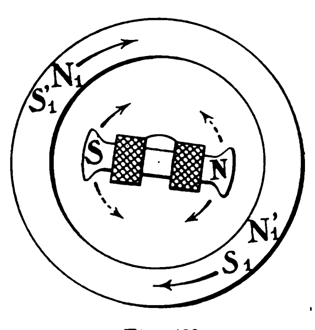


Fig. 408.

Este motor no arrancará por sí solo. En efecto: supongamos que el inductor esté excitado y sea SN su posición: el campo producido por el inducido girará, y sea N_1 S_1 su posición en un cierto instante.

Se ve que se ejerce un par sobre el inductor que tiende a arrastrarlo en la dirección del movimiento del campo, como consecuencia de la atracción que se ejerce entre los polos N_1, S y N, S_1. Pero, a causa de la inercia del inductor y de la velocidad del campo, este último ocupará la posición N'_1 S'_1 antes de empezar a mover el inductor, y en este momento la acción que se ejerce sobre él está dirigida en sentido inverso de la que producía el par, cuando el campo ocupaba la posi-

ción NS, a causa de la repulsión que se ejerce entre los polos S'_1, S y N'_1, N.

Se ve fácilmente que el par cambia de sentido antes de moverse el motor; por lo tanto, no puede haber arranque.

En cambio, si se hace mover el motor de modo que el inductor se mueva con la misma velocidad que el campo, el par será siempre del mismo sentido y el sistema inductor continuará moviéndose.

De igual manera que para los motores sincrónicos de campos alternos simples, una sobrecarga podrá producir el paro de la máquina; estos dos tipos de motores tienen por consiguiente las mismas propiedades.

Sin embargo, los motores de corrientes polifásicas pueden algunas veces arrancar de vacío, porque los núcleos del inductor se encuentran en un campo giratorio, produciéndose por consiguiente en ellos corrientes de Foucault bastante elevadas. Estas corrientes, según la ley de Lenz, tienden a oponerse al movimiento relativo de las piezas polares y del campo; luego desarrollan un par que arrastra al inductor en el sentido del campo, si el par resistente es débil, que es el caso del arranque de vacío.

Se puede utilizar esta propiedad para el arranque de los motores sincrónicos de corrientes alternas simples; para ello se dispone sobre el inducido un segundo devanado de modo que resulten dos circuitos bifásicos; se unen los extremos del primero a las dos líneas y los extremos del segundo a las mismas líneas por medio de un carrete de auto-inducción, lo cual produce entre las dos corrientes un defasaje de unos 90° (fig. 409). Los dos circuitos están entonces recorridos por dos corrientes bifásicas, que dan lugar a un campo giratorio, y el motor arranca de vacío.

Empleo de los motores sincrónicos. — Los inconve-

nientes del motor sincrónico, que son: la dificultad de arranque, la necesidad de una corriente continua para la excitación, y la posibilidad de caer fuera de fase en caso de sobrecarga, hacen que su empleo sea bastante limitado. Se utiliza el motor sincrónico cuando se quiere obtener una velocidad rigurosamente constante, o bien cuando se quiere transformar la energía recibida bajo la forma de corriente alterna, en corriente continua. En este último caso, se emplea un *transformador giratorio*, formado por un sistema inductor y por un núcleo de inducido sobre el cual van dos devanados; el uno es recorrido por las corrientes alternas y sus extremos están unidos a anillos; el otro es un devanado para corriente continua; los extremos de sus secciones están unidos a las láminas de un colector sobre el cual se apoyan dos escobillas que envían la corriente transformada a los circuitos de utilización.

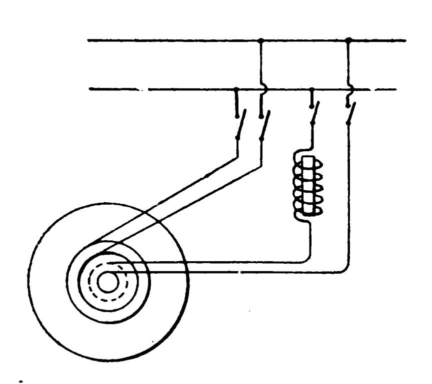


Fig. 409. — Arranque de vacío de un motor sincrónico de corrientes alternas simples.

Se emplean también los motores sincrónicos para obtener sobre una red la concordancia de fase entre la corriente y la tensión, es decir, para reducir a la unidad el factor de potencia. Se demuestra, en efecto, que un motor sincrónico *sobre-excitado* obra, desde el punto de vista del defasaje, como un condensador; produce un defasaje en adelanto de la corriente sobre la tensión, lo cual compensa el defasaje en atraso oca-

sionado por la auto-inducción. Se coloca el motor sincrónico en derivación en el extremo de la línea, se le hace girar de vacío y se eleva la excitación hasta obtener la concordancia de fase.

Motor asincrónico de campo giratorio o motor de inducción. — Este motor se compone: 1.°, de una parte fija formada por circuitos polifásicos en que los conductores están alojados en ranuras practicadas en una masa de láminas de hierro aisladas y convenientemente unidas entre sí; esta parte fija se llama *inductor* o *estator* (cuando las corrientes polifásicas aumentan estos circuitos dan lugar, como ya hemos visto, a uno o a varios campos giratorios); 2.°, de una parte móvil formada por un sistema de conductores cerrados sobre sí mismos; esta parte móvil recibe el nombre de *inducido* o de *rotor*.

El movimiento del rotor se explica fácilmente:

En los conductores del rotor, atravesados por las líneas de fuerza del campo giratorio, se producen corrientes inducidas que dan lugar por su acción sobre el campo, a un par que mueve al rotor en el mismo sentido que el campo. En efecto, las corrientes inducidas, según la ley de Lenz, tienen un sentido tal que tienden a oponerse a la causa que las produce. Ahora bien, esta causa es el movimiento relativo de los circuitos del inducido y del campo giratorio; luego el rotor gira de tal modo que este movimiento relativo tiende a desaparecer y por consiguiente en el mismo sentido que el campo.

Resbalamiento. — Por esta misma razón, el rotor tiende a tomar la misma velocidad que el campo, pero gira siempre con más lentitud, porque si llegara a adquirir la misma velocidad, las espiras del inducido no serían cortadas por el campo; no habría más

corriente inducida y por consiguiente no habría par motor.

Se llama *resbalamiento* a la diferencia entre la velocidad angular del campo y la del rotor; es decir, que es la velocidad relativa del campo respecto al inducido.

Se designa más generalmente con el nombre de resbalamiento, a la relación:

$$g = \frac{\text{velocidad del campo giratorio} - \text{velocidad del rotor}}{\text{velocidad del campo giratorio}}.$$

Siendo ω la pulsación de la corriente que alimenta al estator y $2p$ el número de polos, la velocidad angular del campo giratorio es $\frac{\omega}{p}$, de modo que si ω' es la velocidad angular del rotor, se tiene:

$$g = \frac{\frac{\omega}{p} - \omega'}{\frac{\omega}{p}}.$$

Si la velocidad en el sincronismo es n_0 vueltas por segundo, y si la velocidad del rotor es n vueltas por segundo, se tiene:

$$\frac{\omega}{p} = 2\pi n_0 \qquad \text{y} \qquad \omega' = 2\pi n;$$

por consiguiente:

$$g = \frac{2\pi n_0 - 2\pi n}{2\pi n_0} = \frac{n_0 - n}{n_0}.$$

La frecuencia de la corriente en el estator es de N períodos por segundo, luego:

$$\omega = 2\pi N \qquad \text{y} \qquad \frac{2\pi N}{p} = 2\pi n_0;$$

de manera que:

$$n_0 = \frac{N}{p}.$$

Por lo tanto, se puede escribir también:

$$g = \frac{\frac{N}{p} - n}{\frac{N}{p}}.$$

Rotor. — El rotor de los motores de poca potencia está formado por conductores cerrados en corto-circuito: se construye del modo siguiente:

Un cilindro de láminas de hierro aisladas está agujereado, sobre su periferia, y en los agujeros se colocan barras de cobre unidas en corto-circuito en cada extremo por una corona de cobre. Este rotor se llama *rotor de jaula de ardilla* (fig. 410).

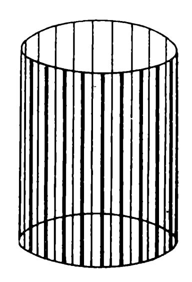


Fig. 410.

Para los motores de mayor potencia se construyen rotores con devanado; estos rotores están constituídos por tambores con devanados que dan el mismo número de polos que el estator. Los extremos de estos circuitos están unidos a anillos fijos sobre el árbol del rotor: estos anillos tienen por objeto poner en comunicación al arrancar los circuitos inducidos con las resistencias de un reostato.

Par motor al arrancar. — Consideremos dos polos *N*, *S*, creados por los dos circuitos polifásicos del estator, y supongamos un conductor que se mueve en el mismo sentido *F* que estos polos (fig. 411). Se sabe que cuando el conductor pasa por la línea neu-

tra OO', su f. e. m. inducida cambia de sentido: siendo en A_2 B_2 (región OR) de sentido f'_1 y en A_1 B_1 (región OP) de sentido contrario f_1. Los sentidos f_1 y f'_1 están dados por la regla de los tres dedos (pág. 221).

Si se supone que los circuitos a que pertenece este conductor no tienen auto-inducción, las corrientes que los recorren están en fase con las f. e. m. inducidas, cuyos valores están dados por las ordenadas de la sinusoide $x\,y\,z$.

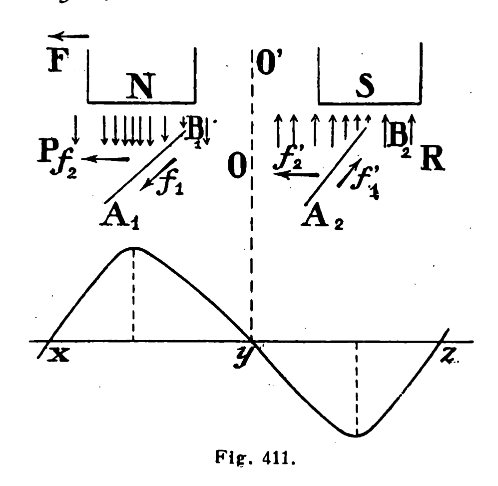


Fig. 411.

Las corrientes en A_1 B_1 y A_2 B_2 tienen, en este caso, los sentidos de las flechas f_1 y f'_1; pero en la región OP, el campo está dirigido en sentido inverso que el campo en la región OR, de manera que las fuerzas que actúan sobre los conductores están siempre dirigidas en el mismo sentido (regla de los tres dedos, página 234).

En el caso del rotor completamente devanado, todos los conductores están sometidos a fuerzas que tienden a moverlos en el mismo sentido, que es el del campo giratorio.

Supongamos ahora que los circuitos a que pertenecen estos conductores poseen auto-inducción; la corriente en cada uno de ellos estará defasada sobre la f. e. m. en atraso, y sus valores estarán representados por las ordenadas de la sinusoide $x' \, y' \, z'$ (fig. 412).

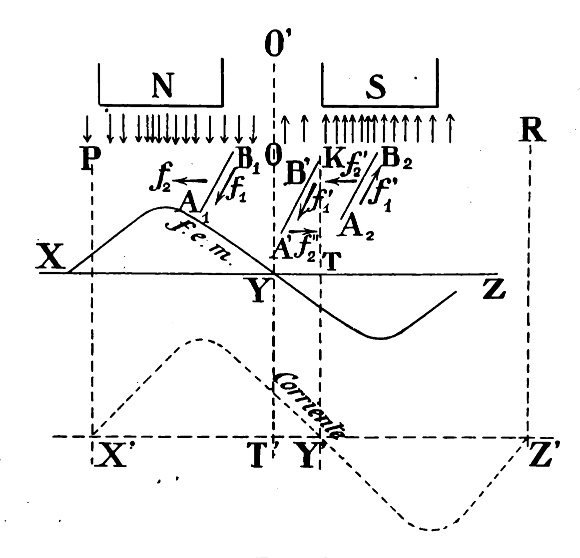


Fig. 412.

Se ve que en el intervalo OK, la corriente tiene el mismo sentido f'_1 que en la región OP, en que el sentido es f_1; pero el conductor $A' \, B'$, en el intervalo OK, está en un campo cuyas líneas de fuerza están dirigidas en sentido inverso de las que cortan a $A_1 \, B_1$; por consiguiente, está sometido a una fuerza f''_2, dirigida en sentido inverso de la que actúa sobre el conductor cuando se encuentra en los intervalos PO y KR.

Si se supone el rotor completamente devanado, se ve que todos los inductores comprendidos en los intervalos semejantes a OK están sometidos a una

fuerza antagonista dirigida en sentido inverso de la rotación de la máquina.

Ahora bien, cuando las espiras están cerradas en corto-circuito, su resistencia es muy pequeña; el defasaje entre la corriente y la fuerza electromotriz inducida es un ángulo φ tal, que

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \pi N \mathcal{L}}{R};$$

siendo N la velocidad relativa del campo y del rotor, $\mathcal{L}$ el coeficiente de auto-inducción del circuito del inducido, y R la resistencia de este circuito.

Al arrancar, el rotor no gira, y la velocidad relativa N es igual a la velocidad del campo; y como ésta

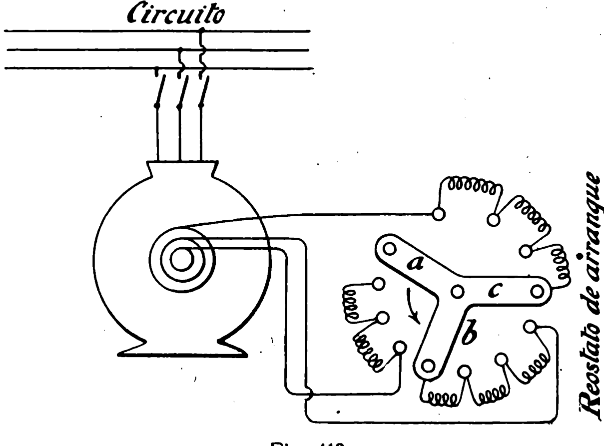


Fig. 413.

es bastante grande, y R es pequeña, el defasaje es muy considerable. Los intervalos tales como OK son por consiguiente muy grandes y hay un gran número de conductores sometidos a una fuerza dirigida en sentido inverso de la rotación: se tiene, pues, un par de arranque muy débil.

Para aumentar el par es preciso disminuir los intervalos *OK*, es decir, el defasaje, lo cual se obtiene aumentando *R* por medio de un reostato colocado en los circuitos inducidos. Después del arranque, el motor toma una velocidad casi igual a la del campo, la velocidad relativa *N* disminuye y al mismo tiempo el defasaje; por lo tanto se podrán suprimir las resistencias.

EJEMPLO.—*Motor trifásico de inducción.*—Los tres extremos del circuito del rotor, en estrella por ejemplo, están unidos a tres anillos y las escobillas a los tres bornes de un reostato montado en estrella si el rotor es trifásico. Para arrancar, se mueve progresivamente el sistema de brazos *a*, *b*, *c*, de manera que se suprima el reostato del circuito (fig. 413).

Motores asincrónicos de corrientes alternas simples.— Hay dos tipos de estos motores: los motores de inducción y los motores con colector.

I. Motor de inducción. — Está construído del mismo modo que un motor de inducción de corrientes polifásicas; pero el estator no tiene más que un solo devanado alimentado por una corriente alterna simple que da origen a un campo de dirección constante y de intensidad alterna. El rotor está constituído por uno o varios devanados en corto-circuito.

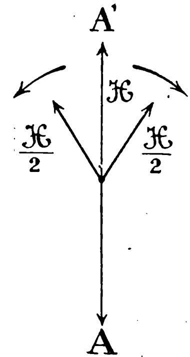


Fig. 414.

El funcionamiento de un motor de esta clase puede explicarse por el hecho de que un campo alterno simple, de dirección constante, puede considerarse como resultante de dos campos iguales, de intensidad constante igual a la mitad del valor máximo del campo alterno, y que giran

en sentido contrario uno del otro, con una velocidad angular igual a la frecuencia del campo alterno multiplicada por 2π.

En efecto, consideremos un campo alterno dirigido según la recta AA', y que toma valores comprendidos entre dos valores máximos OA y OA' iguales a $\mathcal{H}$ (fig. 414).

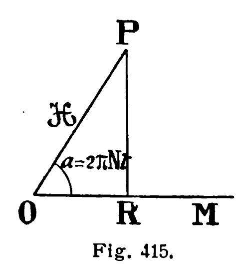


Fig. 415.

Es fácil hallar el valor de este campo en un instante dado cualquiera t aplicando el procedimiento que hemos empleado (página 380) para determinar un valor instantáneo de una magnitud alterna. Bastará formar un ángulo $MOP = a = 2\pi Nt$, siendo N la frecuencia del campo (fig. 415); tomar sobre OP una longitud

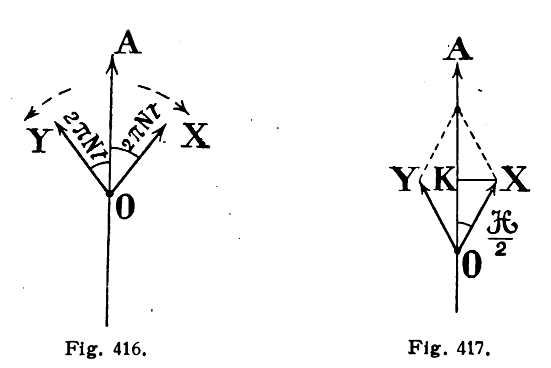


Fig. 416. Fig. 417.

igual al valor máximo $\mathcal{H}$ del campo y trazar PR perpendicular a OM. El valor del campo en el instante t es OR; en el triángulo rectángulo OPR se tiene:

$$OR = OP \cos a, \quad \text{o sea} \quad OR = \mathcal{H} \cos 2\pi Nt.$$

Por consiguiente, el campo alterno considerado tiene por valor al cabo del tiempo t: $\mathcal{H} \cos 2\pi Nt$.

Supongamos dos campos de intensidad constante $\frac{\mathcal{H}}{2}$ girando en sentido inverso con una velocidad igual a la frecuencia del campo, es decir, girando del ángulo $2\pi N$ durante la unidad de tiempo. Al cabo del tiempo t, habrán girado de un ángulo $2\pi Nt$, en sentido inverso uno de otro, y estarán representados por los dos vectores OX y OY (fig. 416).

Su resultante está representada por la diagonal del paralelogramo construído sobre OX y OY; se ve que está dirigida según OA, que es la dirección del campo (figura 417). Además tiene el mismo valor que el campo para el mismo instante: $\mathcal{H} \cos 2\pi Nt$.

En efecto, sea OS la longitud de esta diagonal; por ser $OX = OY = \frac{\mathcal{H}}{2}$, el triángulo OXS es isósceles y el pie de la perpendicular XK es el punto medio de OS. En el triángulo OXK se tiene:

$$OK = OX \cos 2\pi Nt;$$

ahora bien:

$$OX = \frac{\mathcal{H}}{2},$$

luego:

$$OK = \frac{\mathcal{H}}{2} \cos 2\pi Nt$$

y

$$OS = 2\,OK = \mathcal{H} \cos 2\pi Nt,$$

que es el valor del campo alterno en el instante t.

De aquí se deduce que cuando las espiras del inducido se encuentran en el campo alterno creado por el estator, todo se verifica como si estos conductores, que están en corto-circuito, estuvieran cortados por

las líneas de fuerza de dos campos de intensidad constante que giran en sentido inverso uno de otro con una velocidad angular igual a la frecuencia de la corriente alterna que alimenta al estator, multiplicada por 2π.

Según lo que hemos visto acerca de los motores de inducción de corrientes polifásicas, estos dos campos tienden a arrastrar cada uno en su sentido a los conductores del rotor, que, solicitado a la vez en dos sentidos opuestos, no puede arrancar.

Supongamos que se hace girar el rotor; la velocidad relativa de los circuitos inducidos respecto al campo que gira en el mismo sentido que ellos, disminuye; la frecuencia de las corrientes inducidas, producidas de este modo, es igual a la diferencia entre las dos velocidades del campo y de estos circuitos, y es muy pequeña. En cambio, la velocidad relativa de estos circuitos y del campo que gira en sentido inverso, es igual a la suma de estas dos velocidades; la frecuencia de las corrientes que este movimiento relativo produce es muy grande.

Al estudiar los motores asincrónicos polifásicos vimos que el par que ejerce el campo giratorio sobre el rotor es tanto mayor cuanto menor es el defasaje entre la fuerza electromotriz inducida en los conductores del rotor y la corriente que los recorre. Ahora bien, este defasaje φ está dado por la relación

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \pi N \mathcal{L}}{R};$$

el ángulo φ será tanto más grande cuanto mayor sea la frecuencia N. Por consiguiente, puesto que la frecuencia de las corrientes producidas por el primer campo es pequeña, el par motor a que da lugar este campo es bastante elevado.

Todo se verifica como en un motor asincrónico de

campo giratorio, pero con un campo igual a la mitad del valor máximo del campo alterno producido, mientras que el estator de un motor de corrientes polifásicas da un campo giratorio igual al valor máximo de los campos producidos por los circuitos si las corrientes son bifásicas, y a vez y media este valor máximo si las corrientes son trifásicas.

Por esta razón es por lo que a igualdad de velocidad angular y de potencia, un motor de corriente alterna simple debe tener dimensiones mayores que un motor de corrientes polifásicas.

Arranque. — Existen varios medios para conseguir el arranque de estos motores; uno de los más empleados consiste en arrollar sobre el estator un devanado especial dispuesto de modo que forme con el devanado principal dos circuitos bifásicos. Este segundo circuito está alimentado al arrancar por una corriente defasada, como ya hemos dicho anteriormente, por medio de un carrete de auto-inducción, de unos 90° sobre la corriente principal. El motor arranca como motor de campo giratorio; cuando está próximo al sincronismo, se suprime el circuito complementario.

II. Motor con colector. — Este motor está construído como un motor de corriente continua excitado en serie. Se sabe, en efecto, que cuando el sentido de la corriente que alimenta un motor de esta clase se invierte, la corriente y el campo cambian al mismo tiempo de sentido, de manera que el par motor conserva el mismo sentido. Se podrá, pues, alimentar este motor con una corriente alterna.

Estos motores tienen la ventaja de tener un par de arranque muy potente, de poder arrancar en carga sin ningún artificio y de tener una velocidad variable que se puede regular con un reostato. Pero, por el contrario, la producción de chispas en el colector es

considerable; sin embargo, pueden reducirse alimentando el motor con corrientes de baja frecuencia (15 a 20 períodos). Su rendimiento es mucho menor que el de los motores asincrónicos ordinarios.

Se emplean estos motores en algunos casos particulares: ascensores, arranque de motores sincrónicos, etc.

Se construyen actualmente motores con colector, derivados de los motores de corriente continua, en shunt o en serie, de los cuales es imposible ocuparnos en este tratado. Son motores que, por sus propiedades particulares, parece que resuelven el difícil problema de la tracción a larga distancia.

CAPÍTULO XXII

Sobretensiones (tensiones excesivas)

Sucede con mucha frecuencia que los conductores que forman una red se encuentran sometidos bruscamente a grandes elevaciones de tensión, capaces de producir accidentes graves y de ocasionar interrupciones en el servicio.

Estas sobretensiones pueden producirse por descargas atmosféricas, en cuyo caso se evitan por medio de pararrayos; o también por perturbaciones ocasionadas por maniobras de aparatos, o por corto-circuitos, o por fenómenos de resonancia; en estos casos se protege la instalación con limitadores de tensión. Pararrayos y limitadores de tensión pueden combinarse en un solo aparato.

Sin extendernos sobre estos fenómenos complejos de sobretensiones, debidas a maniobras de aparatos y a la resonancia de armónicas, daremos algunas nociones que permitirán darse cuenta de la necesidad del empleo de los limitadores de tensión.

I.—Sobretensiones debidas a maniobras de aparatos

a) **Energía acumulada en un campo magnético.**— Consideremos un circuito AB de resistencia r cuyo

coeficiente de auto-inducción $\mathcal{L}$ es constante, unido por un interruptor a un generador S que mantiene una diferencia de potencial u (fig. 418).

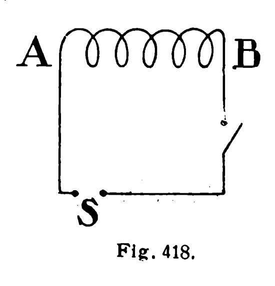


Fig. 418.

Cuando se cierra el interruptor pasa una corriente por el circuito, creándose al mismo tiempo un campo creciente con la corriente; sabemos que cuando la corriente tiene un valor i, el flujo producido a través del circuito por el campo creado tiene por valor $\mathcal{L}i$.

Al cabo de un tiempo T, muy corto, la corriente toma un valor invariable I si la tensión se mantiene constante, y esta corriente es la corriente de régimen. El flujo a través del circuito es entonces $\mathcal{L}I$.

En un cierto momento comprendido entre 0 y T, es decir, entre el cierre y el instante en que se establece la corriente de régimen, la corriente tiene un cierto valor i comprendido entre 0 e I. Se sabe que en este momento hay en el circuito una fuerza electromotriz de auto-inducción e, teniéndose:

$$u = ri + e,$$

o bien:

$$ui = ri^2 + ei.$$

Después de un *tiempo infinitamente pequeño, t*, que sigue al instante considerado, la corriente se hace i'; la energía producida por el generador en este tiempo es uit, y se tiene:

$$uit = ri^2t + eit,$$

siendo ri^2t la energía disipada en calor en el circuito, y eit la parte de energía producida por el generador que no se ha transformado en calor. Ahora bien,

no se ha producido trabajo mecánico ni fenómeno químico, pero en cambio el campo magnético ha aumentado y el flujo se ha elevado del valor $\mathcal{L}i$ al valor $\mathcal{L}i'$. La expresión eit mide, por consiguiente, la energía que ha tenido que dar el generador para producir este aumento de campo. Pero se sabe que:

$$e = \frac{\mathcal{L}(i' - i)}{t},$$

luego la energía tomada al generador para producir el aumento del campo magnético correspondiente al incremento $i' - i$ de la corriente, es:

$$eit, \quad \text{o sea} \quad \frac{\mathcal{L}(i' - i)}{t} \times it = \mathcal{L}i\,(i' - i).$$

Dividamos en intervalos infinitamente pequeños t el tiempo comprendido entre cero y T, es decir, el tiempo transcurrido entre el instante del cierre, cuando la corriente es cero, y el instante en que la corriente de régimen se establece, o sea en que la corriente toma el valor I. La suma de los valores que toma la expresión $\mathcal{L}i\,(i' - i)$ en cada uno de estos intervalos medirá el trabajo tomado al generador para el establecimiento del campo correspondiente a la corriente I, y por consiguiente la energía acumulada en este campo. Para evaluar esta suma llevaremos sobre una recta Ox los valores de la corriente i y sobre una perpendicular a Ox los valores correspondientes del flujo $\mathcal{L}i$ (fig. 419); como $\mathcal{L}$ es constante, la línea que resulta de unir los puntos obtenidos es una línea recta OA.

Sea OM una longitud que mide el valor i de la corriente en un momento comprendido entre cero y T; la ordenada MP medirá $\mathcal{L}i$; después de un tiempo infinitamente pequeño, la corriente habrá tomado un

valor i', medido por OM', y $\mathcal{L}i'$ estará medido por $M'P'$.

La expresión $\mathcal{L}i \times (i' - i)$ tiene por valor:

$$MP \times (OM' - OM), \quad \text{o sea} \quad MP \times MM',$$

es decir, la superficie del rectángulo $MPKM'$. Ahora bien, siendo t infinitamente pequeño, M' está infinitamente cerca de M y $P'K$ es infinitamente pequeño, de modo que la superficie del rectángulo $MPKM'$ es igual a la superficie $MPP'M'$.

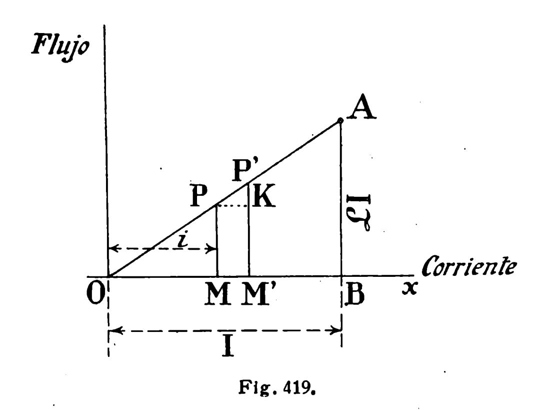


Fig. 419.

La suma de los valores $\mathcal{L}i \times (i' - i)$ es por consiguiente la suma de los elementos de superficie $MPP'M'$, es decir, la superficie del triángulo OAB. Pero $OB = I$ y $AB = \mathcal{L}I$, luego:

La energía tomada al generador y acumulada en el campo magnético tiene por valor:

$$\frac{1}{2}\mathcal{L}I \times I, \quad \text{o sea} \quad \frac{1}{2}\mathcal{L}I^2.$$

b) **Energía tomada por un condensador cargado.**— Sea un condensador de capacidad C que puede unirse mediante un interruptor a un generador S que mantiene una tensión U (fig. 420). Cuando se cierra el

interruptor, el condensador se carga y la tensión entre sus armaduras toma el valor U, que alcanza al cabo de un tiempo muy corto T.

En un cierto instante, comprendido entre cero y T, la tensión entre las armaduras tiene un valor u comprendido entre cero y U, y la corriente de carga tiene un valor i.

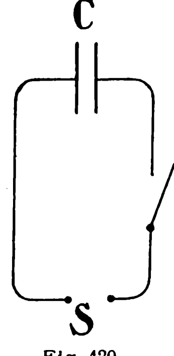


Fig. 420.

Después de un tiempo infinitamente pequeño t, que sigue al instante considerado, la tensión se eleva y toma un valor u'. Ahora bien, se sabe que la carga de un condensador tiene por valor el producto de la tensión entre sus armaduras por su capacidad; por consiguiente, durante el tiempo t la carga aumenta de Cu a Cu', es decir, que su incremento es:

$$C(u' - u).$$

En el instante considerado, la corriente de carga tiene el valor i, luego la cantidad de electricidad tomada por el condensador, es decir, el aumento de carga durante el tiempo t es it. Se tiene, por consiguiente:

$$C(u' - u) = it.$$

Ahora bien, la diferencia de potencial en el instante considerado es u, luego la energía absorbida por el condensador, correspondiente a este aumento de carga, es:

$$u \times it,$$

o sea:

$$C(u' - u) \times u = Cu(u' - u).$$

La suma de los valores de este aumento de energía durante los intervalos de tiempo t en que se divide el

tiempo T, medirá la energía tomada por el condensador. Para evaluar esta suma se toman como abscisas los valores de u y como ordenadas los valores de Cu, obteniéndose una recta OA (fig. 421):

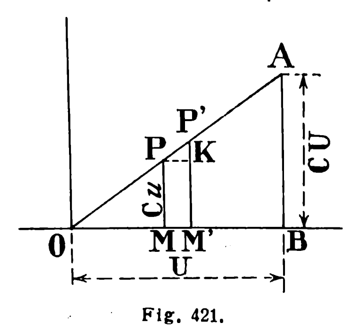


Fig. 421.

$$OB = U, \qquad AB = CU.$$

Los valores de u y u' están representados por OM y OM', estando M' infinitamente cerca de M. Los valores Cu y Cu' están representados por MP y $M'P'$, de modo que $Cu \times (u'-u)$ mide la superficie del rectángulo $MPKM'$, y por consiguiente, por ser $P'K$ infinitamente pequeño, la superficie del trapecio $MPP'M'$. La suma de los valores $C(u' - u)\, u$ tendrá, pues, por valor el número que mide la superficie del triángulo OAB, que es:

$$\frac{OB \times AB}{2}.$$

Por consiguiente, *la energía tomada por el condensador es:*

$$\frac{1}{2} CU \times U = \frac{1}{2} CU^2.$$

c) **Sobreelevación de tensión debida al cierre de un circuito.**—Sea una línea que tiene un coeficiente de auto-inducción $\mathcal{L}$ y una capacidad C. Cuando esta línea es recorrida por una corriente I, la energía acumulada en la línea es $\frac{1}{2} \mathcal{L} I^2$.

Si se abre bruscamente el circuito, esta energía es absorbida por la capacidad de la línea, de modo que

se tendrá entre los conductores una tensión U' tal, que

$$\frac{1}{2} C U'^2 = \frac{1}{2} \mathcal{L} I^2,$$

de donde:

$$U'^2 = \frac{\mathcal{L} I^2}{C}, \qquad U' = I \sqrt{\frac{\mathcal{L}}{C}}.$$

El valor de $\frac{\mathcal{L}}{C}$ es independiente de la longitud de la línea, por ser $\mathcal{L}$ y C proporcionales a esta longitud.

La cantidad $\sqrt{\frac{\mathcal{L}}{C}}$ es homogénea a una resistencia, pues el producto de esta cantidad por una corriente da una tensión.

Además, si expresamos $\mathcal{L}$ y C por sus ecuaciones de las dimensiones en el sistema electromagnético, se tiene (pág. 257):

$$\mathcal{L} = L, \qquad C = L^{-1} T^2,$$

luego:

$$\frac{\mathcal{L}}{C} = \frac{L}{L^{-1} T^2} = \frac{L^2}{T^2}$$

y

$$\sqrt{\frac{\mathcal{L}}{C}} = \frac{L}{T}, \qquad \text{o sea} \qquad \sqrt{\frac{\mathcal{L}}{C}} = L T^{-1},$$

que, como se ve, es la ecuación de las dimensiones de una resistencia.

La cantidad $\sqrt{\frac{\mathcal{L}}{C}}$, característica de la línea, se expresará, por consiguiente, en ohms.

En el caso de una línea aérea, $\mathcal{L}$ es bastante grande, mientras que C es pequeña, y la relación $\frac{\mathcal{L}}{C}$ puede ser tan grande que se pueda temer una sobreelevación considerable de tensión.

En el caso de una línea subterránea sucede lo contrario, es decir, la capacidad es muy grande y la relación $\frac{\mathcal{L}}{C}$ es pequeña, siendo menos de temer la sobreelevación de tensión.

La cantidad $\sqrt{\frac{\mathcal{L}}{C}}$ varía de 400 a 900 ohms para las líneas aéreas; de 40 a 150 para las líneas subterráneas, y de 100 a 1000 para las máquinas y transformadores. Así, por ejemplo, en una línea aérea, cuando un disyuntor corta bruscamente el circuito, la sobretensión alcanza de 400 a 900 volts por ampere.

En el caso de corrientes alternas, la sobretensión puede ser muy elevada cuando la corriente se corta en el momento de alcanzar su valor máximo.

Sea, por ejemplo, una línea caracterizada por $\sqrt{\frac{\mathcal{L}}{C}} = 500$ ohms, recorrida por una corriente eficaz de 50 amperes, bajo una tensión de 10000 volts. Si se corta bruscamente la corriente en el momento en que pasa por su máximo, es decir, por el valor $50\sqrt{2}$ amperes, la sobreelevación de tensión es:

$$50\sqrt{2} \times 500 = 35350 \text{ volts.}$$

En realidad, esta elevación queda reducida por el solo hecho de no ser instantánea la ruptura, pues siempre es más o menos prolongada por la chispa que salta entre los contactos de los aparatos.

d) **Descarga oscilante de un condensador.** — Si después de haber cargado un condensador de capacidad C (fig. 422) bajo el potencial U de un generador S, se cierra sobre un conductor MN de poca resistencia R y que tiene un coeficiente de auto-inducción $\mathcal{L}$, se produce en este conductor una *descarga oscilante.*

Una corriente de intensidad rápidamente decreciente circula por MN, llega a anularse, cambia de sentido y crece hasta un máximo, para después decrecer hasta cero, cambiar otra vez de sentido y así sucesivamente, de modo que el conductor es recorrido por una corriente alterna de gran frecuencia y cuyos valores máximos son rápidamente decrecientes (fig. 423).

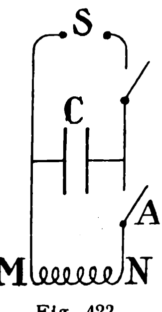


Fig. 422.

Puede formarse una ligera idea de este fenómeno de la manera siguiente:

En el momento cero o de cierre del interruptor A, el condensador está cerrado sobre un conductor de pequeña resistencia, y una corriente elevada pasa por este conductor, de modo que al cabo de un tiempo t muy corto, que sigue al

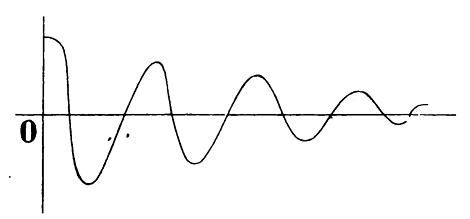


Fig. 423.

cierre, la corriente tiene un valor i y el flujo que atraviesa el circuito MN, y que era nulo, toma un valor $\mathcal{L}\, i$. En el circuito se desarrolla una fuerza electromotriz de valor $\frac{\mathcal{L}\, i}{t}$, y como t es extremadamente pequeño, esta fuerza electromotriz toma un valor superior a U y el condensador vuelve a cargarse hasta que se establece el equilibrio entre la tensión creciente entre las armaduras del condensador y la fuerza electromotriz decreciente del conductor. En

este momento el condensador se descarga otra vez, se produce una nueva fuerza electromotriz en el conductor, el condensador vuelve a cargarse, se descarga a continuación en el conductor y así sucesivamente, produciéndose una corriente oscilante en el circuito.

El período de esta corriente es:

$$T = \frac{1}{N} = 2\pi \sqrt{\mathcal{L} \times C};$$

este valor *es el período propio de oscilación del circuito.*

Observación. — La expresión $\sqrt{\mathcal{L} \times C}$ debe ser homogénea a un tiempo; en efecto, se ha visto (página 257) que:

$$\mathcal{L} = L \quad \text{y} \quad C = L^{-1}\, T^2,$$

por consiguiente:

$$\mathcal{L}\, C = L \times L^{-1}\, T^2 = T^2 \quad \text{y} \quad \sqrt{\mathcal{L}\, C} = T.$$

Luego si $\mathcal{L}$ y C están expresados respectivamente en henrys y en farads, unidades derivadas del sistema C. G. S., $2\pi\sqrt{\mathcal{L}\, C}$ estará expresada en unidades C. G. S. de tiempo, o sea en segundos; y $\frac{1}{2\pi\sqrt{\mathcal{L}\, C}}$ será la frecuencia, es decir, el número de períodos por segundo.

e) **Sobretensión producida por las descargas oscilantes debidas a las rupturas o cierres de circuitos, y a los corto-circuitos.**—Es fácil comprender que toda perturbación producida por cierres o aperturas bruscas de circuitos y por la producción o la extinción de corto-circuitos, tiene por efecto descargar las capacidades de la red sobre los conductores inductivos de la línea,

los aparatos en servicio y las máquinas generadoras o receptoras. La frecuencia de las corrientes oscilantes puede ser considerable; si por ejemplo $C = 0{,}2$ microfarad y $\mathcal{L} = 1$ henry, se tiene:

$$N = \frac{1}{2\pi\sqrt{1 \times \frac{0{,}2}{10^6}}} = \frac{10^3}{2\pi\sqrt{0{,}2}} = 350.$$

La tensión entre los extremos de un circuito que tiene un coeficiente de auto-inducción $\mathcal{L}$ y está recorrido por una corriente i, es $2\pi N \mathcal{L} i$, y si N toma un valor bastante superior a la frecuencia normal se produce una sobretensión importante.

Por estas razones, al poner en circuito un transformador de circuito secundario abierto, pueden producirse saltos de intensidad que alcancen hasta 100 veces el valor de la corriente permanente en vacío, o sea de 8 a 12 veces el valor de la corriente en plena carga. Al quitar de un circuito un transformador de alta tensión pueden producirse, a causa de la capacidad de los devanados, sobretensiones que alcancen de 3 a 4 veces la tensión normal. Fenómenos semejantes se producen cuando se ponen o se quitan de circuito motores de inducción.

II. — Sobretensiones debidas a los efectos de resonancia

a) **Fenómenos de resonancia.**—Consideremos un circuito sometido a una tensión alterna de 5000 volts, frecuencia 50 y que comprende, montados en serie:

Un aparato de 10 ohms de resistencia, cuyo coeficiente de auto-inducción es 0,5 henry, y una capacidad de 50 microfarads.

La reactancia del circuito inductivo es:

$$\mathcal{L}\,\omega = 0{,}5 \times (2 \times 3{,}14 \times 50) = 0{,}5 \times 314 = 157 \text{ ohms.}$$

La reactancia debida a la capacidad es:

$$\frac{1}{C\omega} = \frac{1}{\frac{50}{10^6} \times 314} = \frac{10^6}{50 \times 314} = 63{,}6 \text{ ohms.}$$

La reactancia total del circuito es por lo tanto:

$$\mathcal{L}\,\omega - \frac{1}{C\omega} = 157 - 63{,}6 = 93{,}4 \text{ ohms.}$$

La impedancia es:

$$\sqrt{10^2 + 93{,}4^2} = 94 \text{ ohms.}$$

Luego la corriente en el circuito es:

$$I = \frac{5000}{94} = 53 \text{ amperes.}$$

La tensión entre los extremos del conductor inductivo es:

$$\mathcal{L}\,\omega\, I, \qquad \text{o sea} \qquad 157 \times 53 = 8321 \text{ volts,}$$

y entre los bornes de la capacidad:

$$\frac{1}{C\omega}\, I = 63{,}6 \times 53 = 3370 \text{ volts.}$$

Supongamos que por una maniobra cualquiera se disminuye el coeficiente de auto-inducción del primer circuito hasta que su reactancia sea igual a la debida a la capacidad, es decir, hasta que tome un valor $\mathcal{L}'$ tal, que:

$$\mathcal{L}'\,\omega = \frac{1}{C\omega}, \qquad \text{o sea} \qquad \mathcal{L}'\,\omega = 63{,}6.$$

Entonces se dice que el circuito entra *en resonancia*.

Su reactancia total $\mathcal{L}'\omega - \frac{1}{C\omega}$ es nula, su impedancia se reduce a su resistencia óhmica 10 ohms y la corriente toma el valor:

$$\frac{5000}{10} = 500 \text{ amperes.}$$

La tensión en los bornes del circuito inductivo y de la capacidad es entonces:

$$U' = 63{,}6 \times 500 = 31800 \text{ volts.}$$

Es decir, que cuando el circuito entra en resonancia, la tensión en los aparatos aumenta considerablemente sin que el voltaje del generador se haya modificado.

Sea un circuito que tiene un coeficiente de autoinducción $\mathcal{L}$ y una capacidad C; este circuito entrará en resonancia cuando sea recorrido por una corriente cuya pulsación ω tenga un valor tal, que:

$$\mathcal{L}\omega = \frac{1}{C\omega}, \qquad C\mathcal{L}\omega^2 = 1,$$

$$\omega^2 = \frac{1}{\mathcal{L}C}, \qquad \omega = \frac{1}{\sqrt{\mathcal{L}C}}$$

y

$$N = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mathcal{L}C}}, \qquad \text{o bien} \qquad T = 2\pi\sqrt{\mathcal{L}C};$$

$2\pi\sqrt{\mathcal{L}C}$ es el período propio de oscilación del circuito; el fenómeno de resonancia se produce, por consiguiente, cuando el período de la tensión aplicada es igual al período de oscilación del circuito.

b) **Armónicas.** — Hasta aquí hemos admitido que las tensiones que mantiene un alternador entre las líneas de una red que alimenta, eran funciones sinusoidales del tiempo; esto no es en realidad rigurosamente exacto, estas tensiones son funciones periódicas

del tiempo que se representan gráficamente por una curva al parecer sinusoidal, pero que difiere más o menos de la sinusoide. Ahora bien, según los trabajos del notable matemático Fourrier, resulta que toda función periódica del tiempo, de frecuencia N y por consiguiente de pulsación $\omega = 2\pi N$, es la suma de funciones periódicas de frecuencias $2N$, $3N$, .., nN, es decir, de pulsaciones 2ω, 3ω, ..., $n\omega$.

La primera de estas funciones, de igual período que la función periódica que se considera, es la función sinusoidal *fundamental*, representada por la sinusoide siguiente más próxima a la curva que representa la función periódica considerada. Las otras funciones de frecuencia doble, triple, cuádruple, ... tienen aptitudes, es decir, valores máximos, decrecientes a medida que aumenta la frecuencia, y son las *armónicas* de la función periódica. La armónica de pulsación 2ω es la armónica de orden 2, o simplemente la armónica 2; las de pulsación 3ω, 4ω, ..., $n\omega$ son las armónicas 3, 4, ..., n.

Las magnitudes eléctricas alternas (corriente, tensión, ...) no tienen armónicas de orden par; en efecto, los alternadores están construídos de modo que dan fuerzas electromotrices representadas por curvas simétricas respecto al eje de los tiempos.

Para demostrarlo, consideremos una curva que durante el tiempo T (representado por OA) representa una función periódica simétrica respecto al tiempo. Esta curva (fig. 424) está caracterizada por el hecho de que si transportamos la parte BA correspondiente a un semiperíodo, sobre la parte OB correspondiente a un semiperíodo anterior, de manera que B caiga en O y A en B, la suma algebraica de las ordenadas de los puntos de estas dos curvas, que tienen iguales abscisas, es cero.

Supongamos un sistema de sinusoides, la principal de período T, y las armónicas 2, 3, 4, ... de períodos

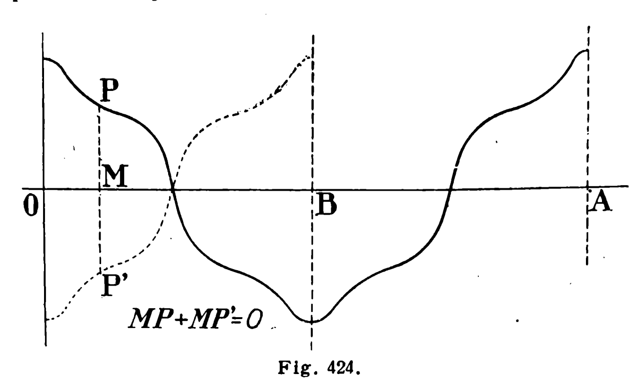


Fig. 424.

$\frac{T}{2}$, $\frac{T}{3}$, $\frac{T}{4}$, ... respectivamente. La curva resultante, que tiene por ordenadas la suma de las ordena-

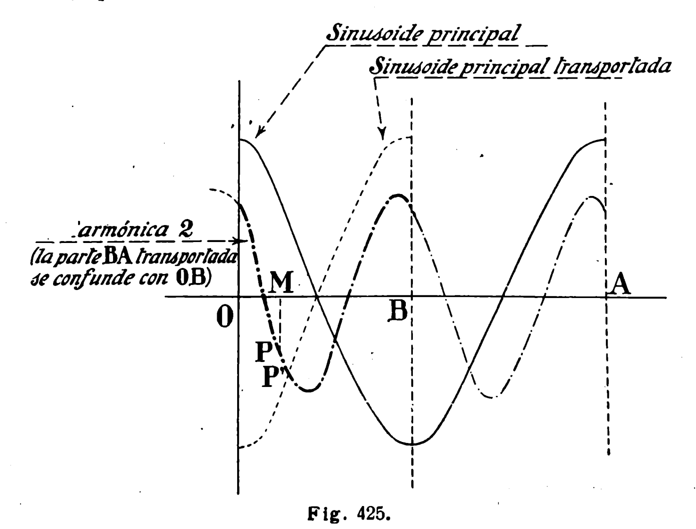


Fig. 425.

das de cada sinusoide, no puede ser simétrica respecto al eje de los tiempos.

En efecto, consideremos una armónica de orden par, la armónica 2, por ejemplo (fig. 425), de período $\frac{T}{2}$. Si se lleva la parte AB sobre OB, se ve que mientras que la parte de la sinusoide principal transportada toma una posición simétrica de esta sinusoide respecto al eje de los tiempos, la parte de la armónica 2 transportada se confunde con esta misma armónica. Es evidente que lo mismo sucede para todas las armónicas de orden par.

Al contrario, la parte BA de la armónica 3, transportada en OB, tomará una posición simétrica de esta

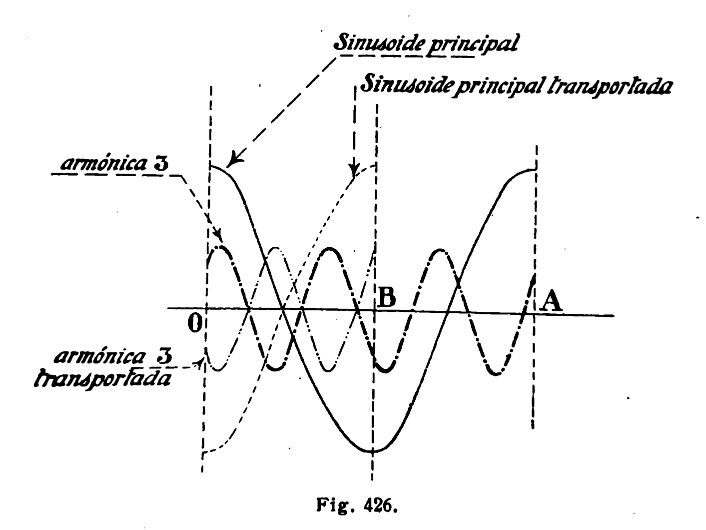


Fig. 426.

misma armónica respecto al eje de los tiempos, y lo mismo sucederá para todas las armónicas de orden impar (fig. 426).

Por consiguiente, si se toma una abscisa cualquiera, a esta abscisa corresponderán las ordenadas de cada una de las sinusoides y de cada una de las

curvas transportadas, según hemos visto. Se podrá construir:

1.° La curva resultante obtenida, tomando para una abscisa dada la suma de las ordenadas de la sinusoide principal y de las armónicas de orden impar.

2.° La curva obtenida procediendo del mismo modo con las mismas curvas transportadas. Estas dos resultantes serán evidentemente simétricas respecto al eje de los tiempos, por ser cero la suma de sus ordenadas referentes a una misma abscisa.

La primera resultante es, según lo que hemos dicho, simétrica respecto al eje de los tiempos.

3.° Las dos curvas obtenidas sumando por una parte las ordenadas de las armónicas de orden par, y por otra parte las ordenadas de estas sinusoides trans-

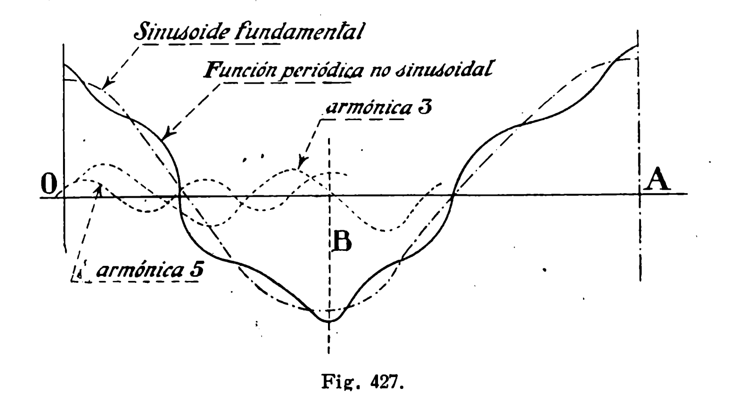


Fig. 427.

portadas; así se obtiene la resultante de las armónicas de orden par y esta misma resultante transportada: estas dos curvas coinciden, y la suma algebraica de las ordenadas relativas a una misma abscisa no es cero. La resultante de las armónicas de orden par no es simétrica respecto al eje de los tiempos.

Siendo la función periódica considerada una curva

en que cada ordenada es la suma de las ordenadas de las dos resultantes precedentes, no está representada por una curva simétrica respecto al eje de los tiempos y sólo podría estarlo en el caso de no existir armónicas de orden par.

Es decir, que una magnitud función periódica del tiempo, representada por una curva simétrica respecto al eje de los tiempos, no contiene armónicas de orden par; en este caso se encuentran las magnitudes eléctricas, corrientes, tensiones, ... producidas por los alternadores.

Resonancia de una armónica. — Una armónica de orden n tiene por pulsación $n\omega$, siendo ω la pulsación de la corriente principal. Luego si el circuito tiene un coeficiente de auto-inducción $\mathcal{L}$ henrys y una capacidad C farads, esta armónica entrará en resonancia cuando se tenga:

$$\mathcal{L} \times n\omega = \frac{1}{C \cdot n\omega},$$

o sea:

$$\frac{1}{n^2} = \mathcal{L} C \omega^2, \qquad n = \frac{1}{\omega \sqrt{\mathcal{L} C}}.$$

Por ejemplo, si:

$$\mathcal{L} = 1{,}5 \text{ henrys}; \quad C = 1{,}082 \text{ microfarads}; \quad N = 25,$$

$$\omega = 3{,}14 \times 50 = 157,$$

se tiene:

$$\frac{1}{157 \sqrt{1{,}5 \times \frac{1{,}082}{10^6}}} = \frac{10^3}{157 \sqrt{1{,}5 \times 1{,}082}} = 5.$$

Por consiguiente, la armónica 5 entrará en resonancia, es decir, podrá dar lugar a sobretensiones, como hemos visto anteriormente.

CAPÍTULO XXIII

Teoría elemental de la telefonía

Una instalación que establece la comunicación telefónica entre dos estaciones, comprende: un transmisor y un receptor en cada estación, y una línea conductora que une ambas estaciones.

Transmisor. — El órgano principal del transmisor es el *micrófono,* que está formado por una serie de barritas de carbón talladas en punta, o por esferitas de carbón. Estas barritas o esferitas están en contacto con dos bloques o dos discos de carbón, de tal modo que no estén encajadas y que puedan sufrir pequeños movimientos bajo la influencia de las vibraciones del aire en su proximidad (figs. 428 y 429).

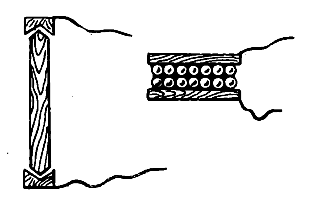


Fig. 428. Fig. 429.

Los dos bloques o discos de carbón están intercalados en un circuito que comprende una pila y la línea, que está unida al receptor de la otra estación.

Receptor. — El receptor o teléfono propiamente dicho está formado por un imán permanente cuyas prolongaciones polares están rodeadas por dos peque-

ños carretes de hilo fino (fig. 430) Los planos de las espiras de estos carretes son perpendiculares al eje de los polos. Delante de estos polos hay una placa delgada de palastro, sujeta por sus bordes y ocupando el fondo de una embocadura de ebonita.

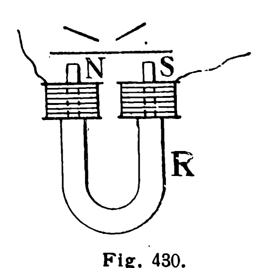


Fig. 430.

Funcionamiento.— El circuito comprende la línea, el teléfono receptor de una estación y el micrófono transmisor de la otra, y puede considerarse formado por dos partes: una de resistencia fija R, constituída por las resistencias de la línea, del teléfono receptor y de los carbones del micrófono transmisor, y otra de resistencia variable r, que es la resistencia de contacto entre los carbones fijos y los carbones móviles (fig. 431). Por consiguiente, si E es la fuerza electromotriz de la pila, la corriente que recorre la línea y que pasa por los carretes del teléfono tiene por valor en cada instante:

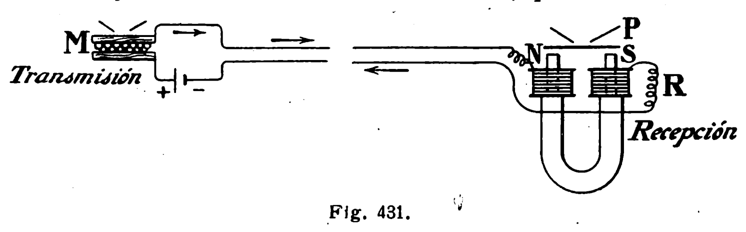


Fig. 431.

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

Cuando se habla delante del micrófono M, los carbones móviles entran en vibración y el valor de la resistencia r en los contactos sufre variaciones que se convierten en variaciones de la corriente.

Estas corrientes variables modifican la imanación de los polos del imán del teléfono receptor *R*, y refuerzan más o menos esta imanación, resultando atracciones variables de la placa de palastro *P*, que entra en vibración, reproduciendo el sonido emitido delante del micrófono *M*.

Teléfono con transformador o de circuito secundario. — Se ve que las variaciones de la corriente que producen las vibraciones de la placa vibrante del receptor se deben a las variaciones de la resistencia total del circuito $R + r$.

Si la distancia entre las dos estaciones es muy grande, la línea tiene una resistencia muy elevada respecto a la resistencia de los contactos *r* y las variaciones de $R + r$ son muy pequeñas, aun para grandes variaciones de *r*; el aparato es poco sensible.

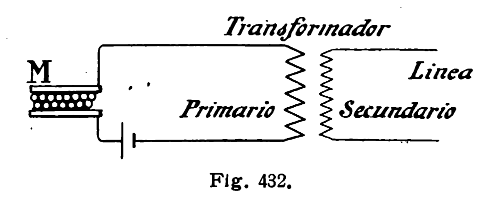


Fig. 432.

Se salva este inconveniente poniendo en la estación transmisora un pequeño transformador formado por un haz de hilos de hierro sobre el cual se arrolla un circuito primario y un circuito secundario (fig. 432). La pila de la estación transmisora está cerrada sobre el micrófono y el primario del transformador y los extremos del secundario van unidos a la línea. En estas condiciones, la corriente producida por la pila es

$$I = \frac{E}{R + r},$$

siendo R la resistencia del circuito primario, de los carbones y de la pila, y r la resistencia en los contactos. Se comprende fácilmente que siendo R muy pequeña, el valor de r es considerable respecto a R y sus variaciones producen variaciones importantes de la corriente.

Además, si el número de espiras del circuito secundario es mayor que el del primario, la tensión en el punto de partida de los hilos de la línea es bastante alta. Por estas razones, la sensibilidad aumenta considerablemente.

CAPÍTULO XXIV

Calefacción eléctrica

La transformación de la energía eléctrica en energía calorífica se realiza por efecto Joule o mediante el arco voltaico.

I. Calefacción por efecto Joule.—Se sabe que si un conductor de resistencia R ohms es recorrido por una corriente de I amperes, la energía gastada en este circuito se transforma en calor y produce $RI^2 \times 0{,}24$ calorías por segundo.

Los conductores utilizados para este sistema de calefacción han de ser bastante resistentes para que bajo las tensiones ordinarias de 110 ó 120 volts, la intensidad de la corriente que los recorra no sea demasiado grande. Para esto es preciso que sean muy finos, siendo por consiguiente muy frágiles; es preciso además que a las temperaturas a que pueden ser elevados no sufran alteraciones y resistan la acción del aire. Todas estas condiciones hacen difícil el problema de la calefacción por este procedimiento; solamente se utiliza hasta ahora en la economía doméstica.

Los cuerpos empleados para estos conductores son: el carbón, metales y mezclas de materias conductoras y aisladoras.

El carbón se emplea en forma de filamentos ence-

rrados en una bombilla de vidrio, como las lámparas de incandescencia. Pero en el interior de las lámparas de calefacción hay un gas inerte que tiene por objeto transportar por convección el calor del filamento al vidrio de la bombilla.

Los metales puros empleados para estos conductores son el hierro y el níquel, pero el hierro se oxida y la resistencia del níquel aumenta considerablemente cuando se eleva su temperatura. Se utilizan mucho más las aleaciones.

Los conductores formados por los metales o sus aleaciones están ordinariamente recubiertos por un esmalte que los protege contra la acción oxidante del aire.

También se fabrican conductores resistentes con polvos metálicos mezclados con arcilla refractaria.

Los aparatos que utilizan estos conductores son: los radiadores, hornos de cocina, planchas, parrillas, etc.

En muchas aplicaciones metalúrgicas, el cuerpo que hay que calentar, el mineral, por ejemplo, constituye el circuito secundario de un transformador cuyo primario tiene muchas espiras y está unido a las escobillas de un alternador; la corriente secundaria circula por la masa misma de los cuerpos que hay que calentar.

II. Calefacción por arco voltaico.— Al saltar el arco entre dos carbones o entre dos puntas de metal, se produce una temperatura altísima.

Se emplea para obtener reacciones químicas que necesitan gran cantidad de calor; el tipo de aparatos en que se verifican estas reacciones es el horno de Moissan (fig. 433). Este horno está formado por un bloque de piedra calcárea en que se ha practicado una

cavidad rectangular; sobre las paredes hay unas placas de magnesia recubiertas de placas de carbón.

Dos barras de carbón penetran en la cavidad y están unidas a los dos polos de un generador de corriente, de una dinamo, por ejemplo. Algunas veces el horno de Moissan se forma simplemente con dos ladrillos de cal viva en que uno de ellos deja pasar las barras de carbón, estando ambos cruzados de manera que formen una cavidad en que se colocan las materias objeto de la operación.

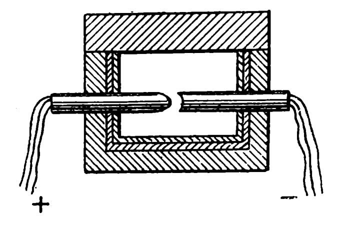


Fig. 433.

Los carbones se ponen al principio en contacto y después se separan, saltando el arco.

Hay muchos hornos de formas y dimensiones variadísimas, según los usos a que se destinan.

Estos hornos se emplean para preparar algunos cuerpos, como por ejemplo el carburo de calcio, el aluminio, etc.

Para fabricar el carburo de calcio, se introduce en un horno de ladrillos, cuyo fondo es de carbón y está unido a uno de los polos de una dinamo, una mezcla de carbón y de cal finamente pulverizados. La mezcla rodea al otro electrodo de carbón que está unido al segundo polo de la dinamo y descansa sobre el fondo de carbón del horno. Cuando se cierra la corriente sobre los electrodos, se eleva el carbón, salta el arco y se produce la combinación entre el carbono y el calcio.

También se utiliza la temperatura elevada del arco para soldar el hierro y para soldaduras autógenas. En este último caso, las dos piezas que hay que soldar se

ponen en contacto y se unen a los dos polos de un generador que pueda dar una corriente de gran intensidad; la resistencia creada por las rugosidades o una ligera oxidación de las superficies en contacto, ocasiona una cantidad de calor suficiente para reblandecer los extremos de las dos piezas.

Estas piezas se aprietan una con otra, quedando soldadas después de su enfriamiento.

CAPÍTULO XXV

Devanado de las máquinas

A) Máquinas de corriente continua

I.—Devanados imbricados en paralelo

Consideremos un tambor, es decir, un cilindro constituído por un conjunto de láminas aisladas entre sí y de poco espesor, a lo largo del cual hay varios conductores colocados paralelamente a su eje (fig. 434).

Se trata de determinar la manera como estos conductores deben estar unidos entre sí y a las láminas del colector para obtener un devanado que tenga las mismas propiedades del devanado en anillo que hemos estudiado en el capítulo XII. Estas propiedades son:

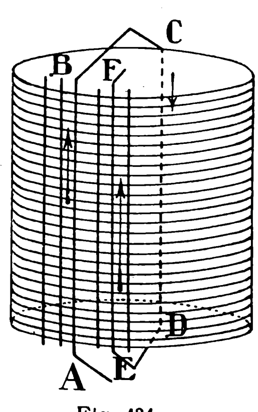


Fig. 434.

1.ª El sistema de los conductores forma un circuito cerrado sobre sí mismo y obra, por consiguiente, como un hilo arrollado en hélice y sin fin;

2.ª Cuando el tambor está en reposo dentro de una armazón inductora, el flujo a través de las espiras del devanado varía progresivamente y de una cantidad muy

pequeña cuando se pasa de una espira a la siguiente;

3.ª La suma de las fuerzas electromotrices inducidas en estos conductores es cero en cada instante de la rotación del tambor;

4.ª Girando el tambor en una armazón de $2p$ polos, el devanado está formado de $2p$ partes en paralelo, cada una de las cuales comprende $\frac{n}{2p}$ conductores montados en serie, siendo n el número total de conductores.

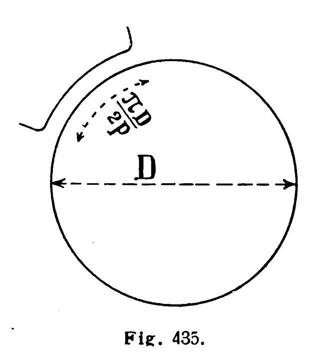


Fig. 435.

Para utilizar convenientemente el flujo emitido por los polos inductores, es evidente que la anchura de una espira, es decir, la distancia medida sobre la periferia del tambor entre dos conductores AB y CD que forman una misma espira, debe ser igual por lo menos a la anchura de un polo, es decir, a $\frac{\pi D}{2p}$, siendo D el diámetro de la sección del cilindro (fig. 435).

Supongamos que el tambor esté colocado verticalmente y sigamos la hélice formada por el sistema de conductores, partiendo de uno cualquiera AB que recorreremos de abajo arriba. AB está unido al conductor CD, recorrido de arriba abajo, y CD está unido a su vez a un tercer conductor recorrido de abajo arriba, y así sucesivamente. A los conductores recorridos de abajo arriba los llamaremos conductores de *ida*, y a los que son recorridos de arriba abajo los llamaremos conductores de *vuelta*. Es evidente que un conductor de ida está siempre unido a un conductor de vuelta y recíprocamente. El número de conductores de ida es evidentemente igual al de conductores de

vuelta, de modo que el número total de conductores es un *número par*. Además, como hay que volver al conductor de que se ha partido, dando la vuelta al tambor, los conductores de vuelta se colocarán entre los conductores de ida, y en todos los devanados hay siempre un conductor de vuelta entre dos conductores de ida, y al contrario, un conductor de ida entre dos conductores de vuelta.

Para que se realice la segunda condición enunciada, es preciso que la espira formada por los dos conductores *AB* y *CD* esté muy cerca de la siguiente, de manera que el conductor de vuelta *CD* de la primera debe estar unido a un conductor de ida *EF* muy próximo a *AB*, y en la práctica *EF* está separado de *AB* por un solo conductor (fig. 434).

En estas condiciones es evidente que la tercera y la cuarta propiedad quedan realizadas.

Antes de hacer un devanado se hace un esquema de este devanado. Para ello se imagina el tambor cor-

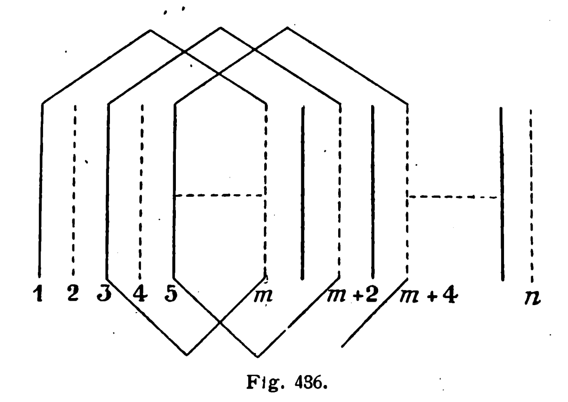


Fig. 436.

tado según una generatriz y extendido sobre un plano, y entonces los conductores estarán representados por líneas paralelas dispuestas unas al lado de otras. Con-

vendremos en representar por un trazo lleno los conductores de ida y por líneas de puntos los conductores de vuelta (fig. 436).

Sea n el número de conductores (n es un número par) y $2p$ el número de polos. Consideremos un conductor colocado bajo el eje de un polo; para que la espira a que pertenece este conductor sea atravesada por el mayor flujo posible, es preciso que este conductor esté unido a un conductor de vuelta que pase muy cerca del eje del polo siguiente. Por lo tanto, si se numeran los conductores de 1 a n, el conductor 1 debe estar unido a un conductor m de orden par, muy próximo al conductor numerado con $\frac{n}{2p}$. Este estará unido al conductor 3 (de ida), que estará unido al conductor de vuelta $m + 2$, unido a su vez al conductor 5, que estará unido al conductor $m + 4$, y así sucesivamente.

Fig. 437.

Se llama *paso del devanado* al número de intervalos comprendidos entre dos conductores unidos; este número es igual al número de conductores que hay entre el conductor de ida, sin contar éste, y el conductor de vuelta a que está unido, contando este último. El número de intervalos que hay entre un conductor de ida y el conductor de vuelta a que está unido es el *paso hacia adelante;* el número de intervalos comprendidos entre un conductor de vuelta y el conductor de ida a que está unido es el *paso hacia atrás* (fig 437, paso hacia adelante, 7; paso hacia atrás, 5).

El paso es evidentemente un número *impar;* la

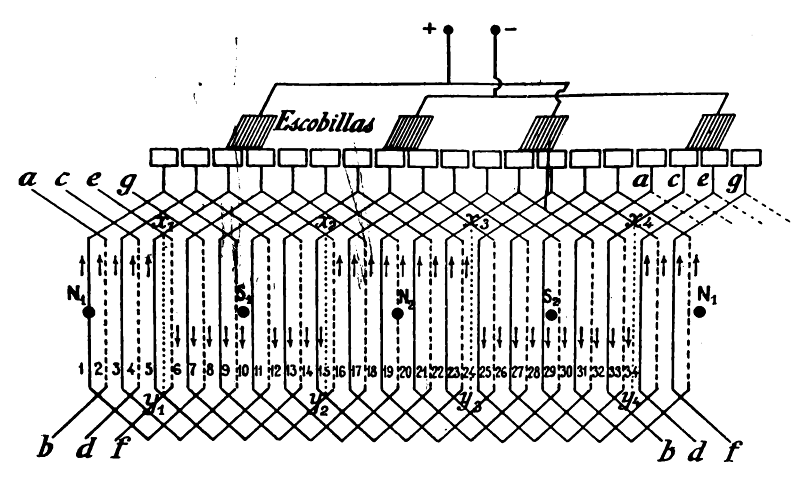


Fig. 438.

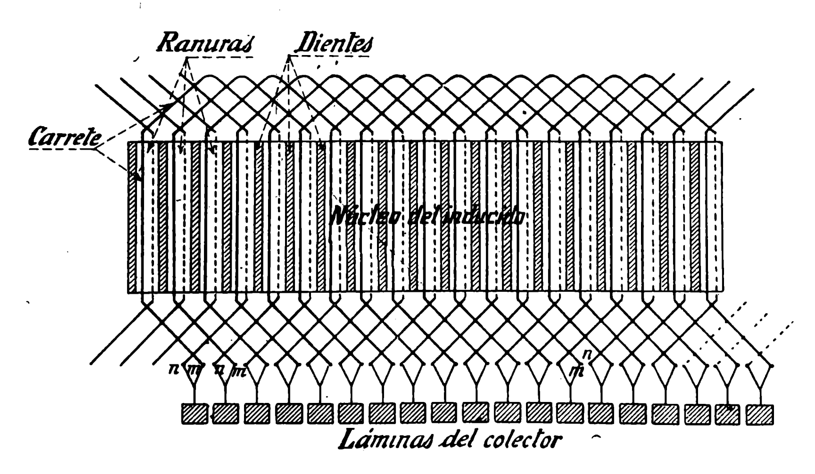


Fig. 439.

diferencia entre el paso hacia adelante y el paso hacia atrás es, según lo expuesto, igual a 2.

Ejemplo. — Máquina con 4 polos y 38 conductores, Paso: $\frac{38}{4} = 9{,}5$. El paso será, por consiguiente, de 9 hacia adelante y 7 hacia atrás. El esquema del devanado está dado por la figura 438, en que N_1, S_1, N_2, S_2 son los puntos por los cuales pasan los ejes de las piezas polares, y $x_1 y_1$, $x_2 y_2$, $x_3 y_3$, $x_4 y_4$ son las líneas neutras. Las flechas que están a lo largo de los conductores indican el sentido de las fuerzas electromotrices inducidas y se ve que el inducido está formado de cuatro partes montadas en oposición. El número de láminas del colector es igual a la mitad del número de conductores y hay cuatro escobillas unidas 2 a 2.

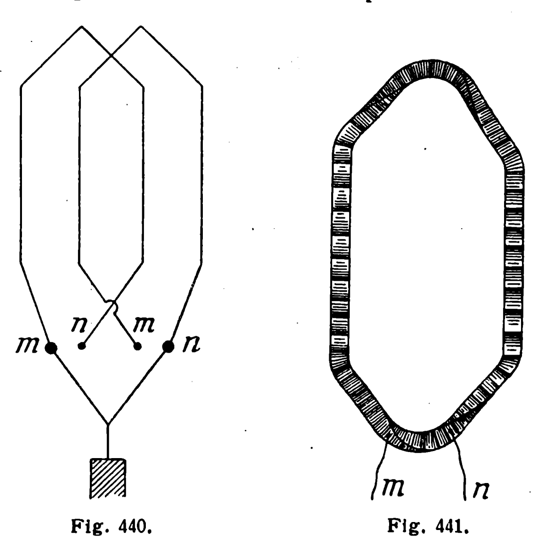


Fig. 440. Fig. 441.

Los conductores están alojados en ranuras practicadas en el tambor, siendo el número de ranuras igual

a la mitad del número de conductores y por consiguiente igual al número de láminas del colector (figura 439).

Un conductor de ida con su correspondiente de vuelta, constituyen una *sección* o *carrete*; en una misma ranura está alojado el conductor de ida de una sección y el conductor de vuelta de otra sección.

Todos los carretes están arrollados en el mismo sentido, es decir, que el principio *m* de cada uno de ellos está unido al fin *n* del siguiente y los dos extremos lo están a una lámina del colector (fig. 440). Generalmente cada sección del inducido está formada por varias vueltas de hilo. Supongamos, por ejemplo, que cada sección del inducido esté formada por 10 vueltas de hilo: se parte de un extremo *m*, se arrollan 10 espiras en las dos mismas ranuras y el fin *n* se une al principio *m* del precedente, y así sucesivamente.

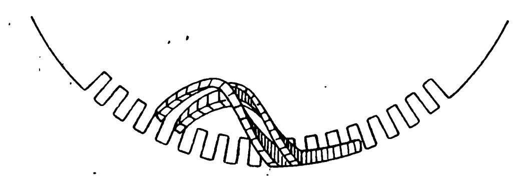


Fig. 442.

Casi siempre se hacen las secciones sobre modelos u hormas y se disponen en las ranuras uniendo sus extremos entre sí y con las láminas del colector, según hemos dicho. Cada uno de estos carretes, después de haberse formado sobre el modelo, se envuelve con una cinta (fig. 441); se colocan entonces en las ranuras de tal modo que el conjunto de conductores de ida de una sección esté por encima del conjunto de conductores de vuelta de otra sección alojados en la misma ranura (fig. 442).

A veces es conveniente señalar de manera clara todos los extremos «principio» de los carretes para no exponerse a unir dos principios entre sí y poner en oposición dos carretes que deben estar en serie.

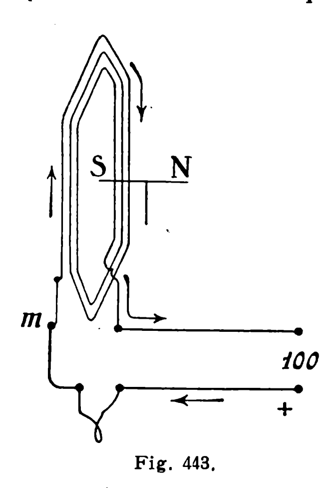


Fig. 443.

Si se tiene alguna duda sobre el sentido del devanado o sobre sus extremos, se procede del modo siguiente: se unen los extremos de los carretes a los dos polos de un generador de poco voltaje (una pila o un elemento de acumulador) o de un generador de gran voltaje, pero intercalando una resistencia (una lámpara, por ejemplo) en los dos extremos de cada carrete, y se coloca cerca una aguja imanada móvil alrededor de un eje; la aguja se orienta perpendicularmente al plano del carrete. Se halla cuál es, de los dos extremos *m n* del carrete, el que se debe unir al polo + del generador, para que el polo norte de la aguja se dirija al mismo lado para todos los carretes; entonces basta tomar como «principio», por ejemplo, todos los extremos *m* (fig. 443).

II.—Devanado ondulado. Arrollamiento en serie

Hemos visto que si un tambor con devanado imbricado gira en una armazón de $2p$ polos, el inducido está formado de $2p$ partes montadas en oposición y la fuerza electromotriz de la máquina es igual a la suma de las fuerzas electromotrices inducidas en los con-

ductores comprendidos en cada una de las $2p$ partes, o sea $\frac{n}{2p}$ conductores, siendo n el número total (página 299).

Se quiere conseguir, por un devanado ondulado, realizar un arrollamiento tal, que cualquiera que sea el número de polos inductores, el inducido no esté formado más que de dos partes en oposición y que por consiguiente la fuerza electromotriz de la máquina sea igual a la suma de las fuerzas electromotrices inducidas en $\frac{n}{2}$ conductores.

Es preciso, por lo tanto, que este inducido al girar en una armazón de $2p$ polos obre como un anillo que gire en una armazón de dos polos. Luego si se recorre el hilo inducido partiendo, por ejemplo, de un polo N, en

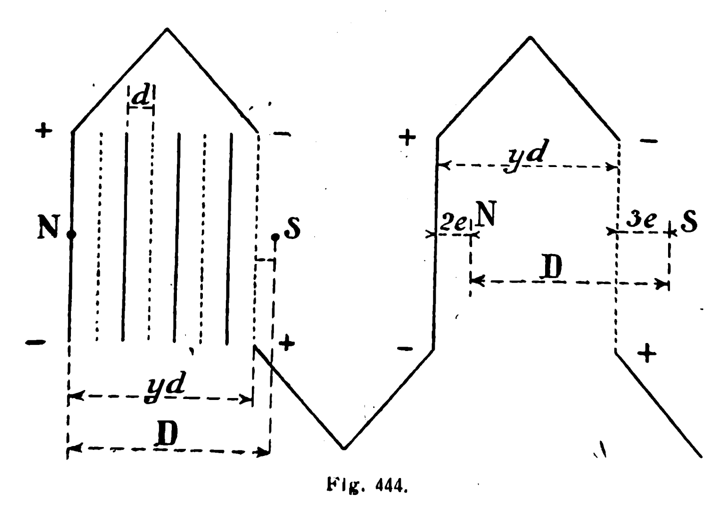


Fig. 444.

los conductores deben producirse fuerzas electromotrices crecientes o decrecientes, debiéndose sumar las fuerzas electromotrices de cada mitad de los conductores.

Para conseguirlo, el conductor de ida que se encuentra bajo un polo N debe unirse a un conductor de vuelta ligeramente desviado de e a un lado o a otro del polo S siguiente (figs. 444 y 445 respectivamente).

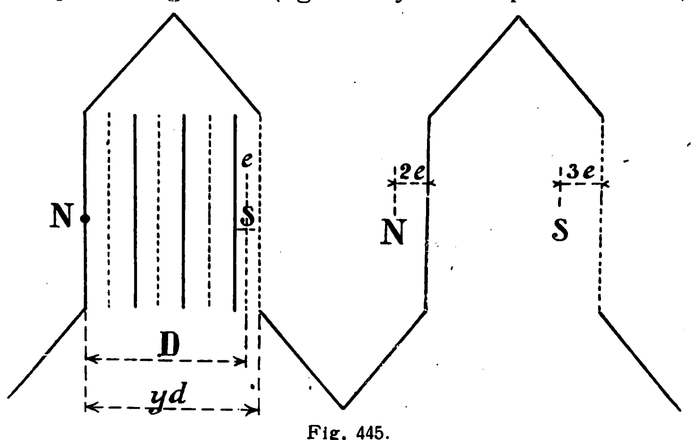


Fig. 445.

Este conductor de vuelta debe unirse a un conductor de ida desviado de $2e$ sobre el polo N siguiente, y este conductor de ida irá unido a su vez a otro de vuelta desviado de $3e$ sobre el polo S siguiente, y así sucesivamente.

Determinación del paso del devanado.—Para que la condición anteriormente enunciada se cumpla y que el circuito inducido se cierre sobre sí mismo, debe haber una cierta relación entre el número de conductores n, el número de polos $2p$ y el paso y del devanado.

Sea D la distancia entre dos polos, distancia medida a lo largo del tambor, y d la distancia entre dos conductores periféricos. La longitud periférica del tambor es evidentemente $2pD$ y también nd, por consiguiente:

(1) $$2pD = nd.$$

Además, se tiene:

$$yd = D - e \qquad \text{(fig. 444)}$$

o también:

$$yd = D + e \qquad \text{(fig. 445)},$$

es decir:

(2) $$yd = D \pm e.$$

Ahora bien, puesto que al recorrer $\frac{n}{2}$ conductores hay que hallarse delante de un polo, será preciso separarse de un polo en una longitud D, y como cada vez que se pasa de un conductor a otro se separa de un polo la cantidad e, se debe tener:

(3) $$\frac{n}{2} e = D,$$

de donde:

$$e = \frac{2D}{n};$$

sustituyendo este valor en la relación (2), se tiene:

$$yd = D \pm \frac{2D}{n},$$

o sea:

$$nyd = D(n \pm 2),$$

y sustituyendo nd por $2pD$ (relación 1), se tiene:

$$2pDy = D(n \pm 2),$$

de donde:

$$2py = n \pm 2$$
$$n = 2py \pm 2.$$

Ejemplo. — Sea una máquina de cuatro polos, $2p = 4$. El número de conductores está dado por la relación:

$$n = 4y \pm 2,$$

que da para los valores y de los pasos 3, 5, 7, 9, 11, los números de conductores: 14 ó 10, 22 ó 18, 30 ó 26, 38 ó 24 y 46 ó 42.

Tomemos, por ejemplo, 38 conductores, que corresponde al paso 9.

El esquema del devanado está dado por la figura 446. Los conductores sucesivos a lo largo de la periferia del inducido están numerados de 1 a 38. El conduc-

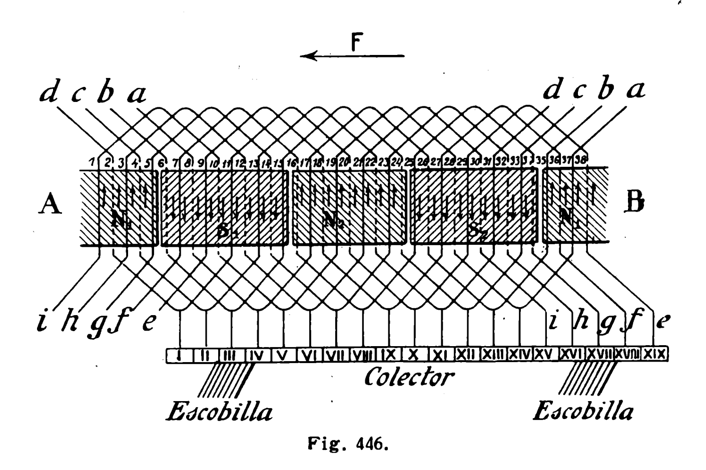


Fig. 446.

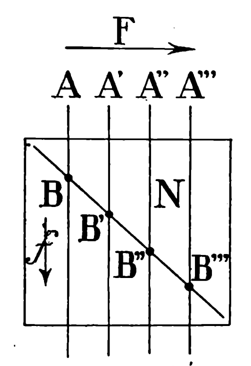
tor 1 está unido al n.° 10, que está unido al n.° 19, unido a su vez al 28; este último al n.° 37, cuyo extremo *a* (lado *B*) se une al extremo *a* del conductor n.° 8 (lado *A*), cuando el núcleo del inducido, representado desarrollado sobre el plano de la figura, toma su forma cilíndrica real.

Recorriendo todos los conductores se ve que se ha formado un circuito cerrado sobre sí mismo.

Las flechas que hay a lo largo de los conductores indican el sentido de las fuerzas electromotrices inducidas en estos conductores; estos sentidos se obtienen por la regla de los tres dedos (pág. 221), admitiendo

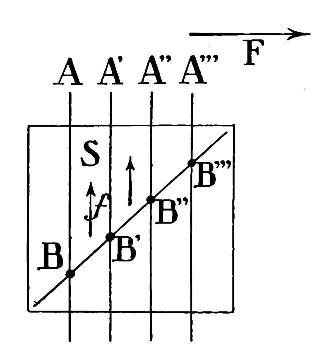
que las líneas de fuerza creadas por los polos inductores están dirigidas hacia adelante del plano de la figura frente a los polos norte y hacia atrás frente a los polos sur. Y que los conductores se mueven en el sentido de la flecha *F*.

Para hallar rápidamente el sentido de las fuerzas electromotrices inducidas, se puede aplicar el procedimiento siguiente: Se sombrean los rectángulos



F, sentido del movimiento del conductor *delante* del polo *N*.

Fig. 447.



F, sentido del movimiento del conductor *delante* del polo *S*.

Fig. 448.

que representan los polos norte en el sentido de la línea oblicua de la letra *N*, y los que figuran los polos sur, en sentido inverso; el sentido *f* de la fuerza electromotriz inducida en un conductor que se mueve delante de un polo es el mismo en que se movería el punto de intersección de las rectas que representan las diferentes posiciones del conductor con una de las rayas del sombreado (figs. 445 y 446).

Cuando se recorren los conductores del modo antes indicado, se encuentran dos conductores unidos entre sí, montados *en serie* si se siguen ambos en el *mismo sentido* que las flechas que indican los sentidos de las f. e. m. inducidas, o ambos *en sentido inverso*.

Por ejemplo, si se recorren los conductores *A B* y *CD*, unidos entre sí, en el sentido *ABCD*, siendo las fuerzas electromotrices de sentido *f* en *AB* y de sentido *f'* en *CD*, se ve que se recorren los dos conductores en el mismo sentido que las flechas *f* y *f'* (fig. 449). Ahora bien, siendo *f* el sentido de la fuerza electromotriz inducida en *A B*, este conductor obrará como una pila que tuviera su polo + en *A* y su polo — en *B*;

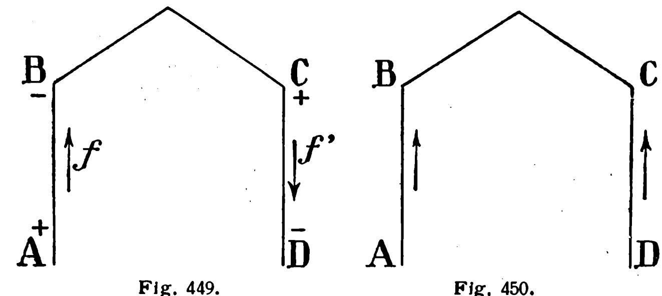


Fig. 449. Fig. 450.

el conductor *CD* obra como una pila que tuviera su polo + en *C* y su polo — en *D*. Estos dos conductores están por consiguiente en serie. Si se recorrieran los dos conductores en el sentido *DCBA*, se seguirían *DC* y *B A*, ambos en sentido inverso de las flechas.

Cuando, al contrario, se recorre uno de los conductores en el sentido de la flecha y el otro en sentido inverso, estos dos conductores se encuentran en oposición (fig. 450).

Ahora bien, se ve que si se recorren los conductores unidos sucesivamente entre sí, a partir del conductor n.° 34 seguido de arriba abajo, se encontrará una serie de 19 conductores montados en serie, hasta el n.° 6, después otra serie de 19 conductores en serie, en oposición con la primera, lo cual demuestra claramente que el circuito del inducido está formado de dos partes en oposición, que es lo que se quería con-

seguir. El inducido obra como un anillo en una armazón bipolar, luego habrá que disponer dos escobillas, una sobre la lámina del colector a que está unido el conductor n.° 34 y la otra sobre la lámina a que está unido el conductor n.° 6.

En efecto, en el esquema de la figura 446 se ve que los únicos grupos de dos conductores montados en oposición son: el 34 y 25, y el 6 y 15, en el instante en que los conductores ocupan, respecto a los polos inductores, las posiciones indicadas en la figura; es decir, que los puntos comunes a estos dos grupos son los que deben unirse a las láminas del colector sobre las cuales se apoyan las escobillas. Estos conductores están en las mismas condiciones que los dos conductores de un devanado en anillo en una armazón bipolar, que se encuentren sobre la línea neutra (fig. 451).

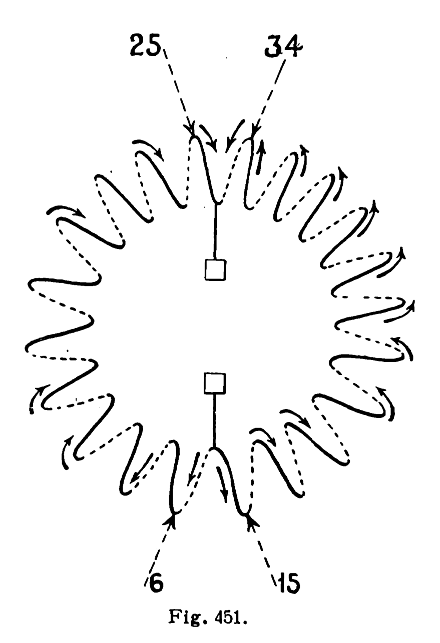


Fig. 451.

La armadura del inducido tiene diecinueve ranuras, en cada una de las cuales se colocan los conductores de dos secciones; es decir, que en la ranura número VI, por ejemplo, está el conductor de ida de la sección *MNP* y el conductor de vuelta de la sección *M' N' P'* (fig. 452).

Lo mismo que para los devanados imbricados, una sección se compone en general de varios conductores arrollados sobre sí mismos. Por ejemplo, si cada sec-

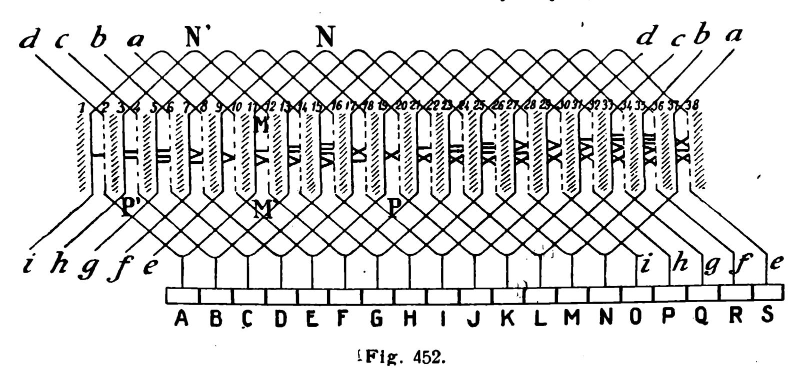


Fig. 452.

ción está formada de tres conductores se tendrán 19 carretes de tres hilos cada uno.

Un carrete está colocado en las ranuras I y V; el fin *b* de este carrete está unido al principio *a'* del

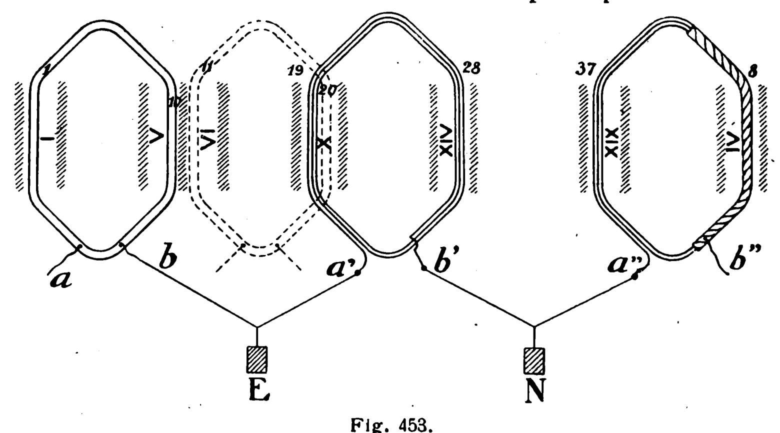


Fig. 453.

carrete colocado en las ranuras X y XIV; el fin de este último al principio del carrete colocado en las ranuras XIX y IV, y así sucesivamente (fig. 453).

Los haces de conductores de vuelta estarán colocados en el fondo de las ranuras y los haces de ida por encima. Partiendo, por ejemplo, de la sección cuyos dos haces están marcados 1 y 10, se encajará el haz 10 en la ranura V; por encima se colocará el haz 9 de la sección siguiente (haces 9-18), cuyo haz 18 se encajará en el fondo de la ranura IX.

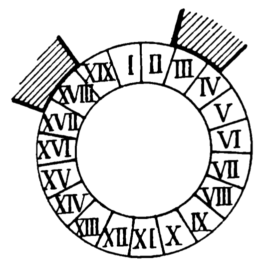


Fig. 454.

Por encima de este último haz se coloca el haz 17 de la sección 17-26, cuyo otro haz 26 estará en el fondo de la ranura XIII, y así sucesivamente; de este modo se llegará a la última sección (haces 31-2), cuyo haz 2 estará en el fondo de la ranura 1 y se colocará, por encima de él, el haz 1 de la primera sección 1-10 que se había dejado libre. Colocadas de este modo las secciones en las ranuras, se unen los extremos entre sí y con las láminas del colector, como ya hemos dicho y como indica la figura 452.

Es fácil ver, según lo expuesto, que sobre el colector se apoyarán dos escobillas solamente y distantes entre sí de 90° (fig. 454). Cualquiera que sea el número de polos inductores, no habrá más que dos escobillas y el inducido estará siempre formado de dos series de conductores montados en paralelo.

Fuerza electromotriz de la dinamo. — Sea $2p$ el número de polos inductores y n el número de espiras inducidas; se ha visto (pág. 294) que la fuerza electromotriz media inducida en una espira tiene por valor $\frac{2pN\Phi}{10^8}$ volts.

Cada una de las dos partes en paralelo del inducido comprende $\frac{n}{2}$ espiras, luego la fuerza electromotriz entre sus extremos es: $\frac{2pN\Phi}{10^8} \times \frac{n}{2} = \frac{pNn\Phi}{10^8}$ volts, es decir, la fuerza electromotriz de la dinamo.

Se ve que con este devanado ondulado en serie, la fuerza electromotriz es proporcional al número de polos inductores, mientras que con un devanado en anillo o imbricado en paralelo, esta fuerza electromotriz es $\frac{Nn\Phi}{10^8}$, independiente del número de polos inductores.

Por consiguiente, se utilizará el devanado ondulado en serie en una armazón multipolar cuando se quiera obtener una tensión elevada. En cambio, la corriente en el circuito exterior no podrá ser más que dos veces la corriente máxima que pueda soportar el hilo del inducido, mientras que con el devanado en paralelo, la corriente en el circuito exterior podrá ser $2p$ veces la corriente máxima en el hilo del inducido.

III. — Devanado ondulado en paralelo

Sea una armazón con $2p$ polos, y se quiere hacer un inducido de devanado ondulado que tenga las propiedades de un inducido en anillo o en tambor imbricado, es decir, formado de $2p$ partes montadas en paralelo.

Designemos como antes por D la distancia entre dos polos, por d la distancia entre dos conductores consecutivos, por y el paso del devanado y por e la cantidad de que van siendo sucesivamente desviados los conductores unidos entre sí, respecto a los polos

N y S consecutivos, según dijimos al tratar del devanado en serie (pág. 564). Se tiene evidentemente:

(1) $$2p\,D = nd$$

(2) $$yd = D \pm e.$$

Para tener $2p$ partes en paralelo es preciso que después de haber recorrido una fracción $\frac{n}{2p}$ de los conductores, partiendo de un conductor situado frente al eje de un polo, se vaya a parar otra vez frente a un polo, y por consiguiente es necesario que se haya avanzado o retrocedido en la cantidad D. Se debe tener, por lo tanto:

$$\frac{n}{2p}e = D,$$

de donde:

(3) $$ne = 2pD.$$

Comparando las igualdades (1) y (2), se ve que $e = d$, y sustituyendo e y D por sus valores respectivos d y $\frac{nd}{2p}$, en la igualdad (2), se obtiene:

$$yd = \frac{nd}{2p} \pm d,$$

de donde:

$$2py = n \pm 2p,$$

luego:

$$\begin{cases} n = 2p\,(y \pm 1) \\ y = \dfrac{n}{2p} \pm 1. \end{cases}$$

El paso debe ser un número entero e impar; se ve que el cociente del número de conductores por el número de polos ha de ser un número entero par.

Ejemplo. — Sea una máquina con 4 polos; $2p = 4$. Para los pasos 5, 7, 9,..., el número de conductores será:

$$\text{paso } 5\begin{cases} n = 24 \\ n = 16, \end{cases} \quad \text{paso } 7\begin{cases} n = 32 \\ n = 24, \end{cases} \quad \text{paso } 9\begin{cases} n = 40 \\ n = 32. \end{cases}$$

Tomemos por ejemplo $y = 7$, $n = 32$: se tendrá entonces el devanado representado en la figura 455, en la cual N_1, S_1, N_2, S_2 indican las posiciones de los ejes de los cuatro polos, y $L_1\,L'_1$, $L_2\,L'_2$, $L_3\,L'_3$, $L_4\,L'_4$,

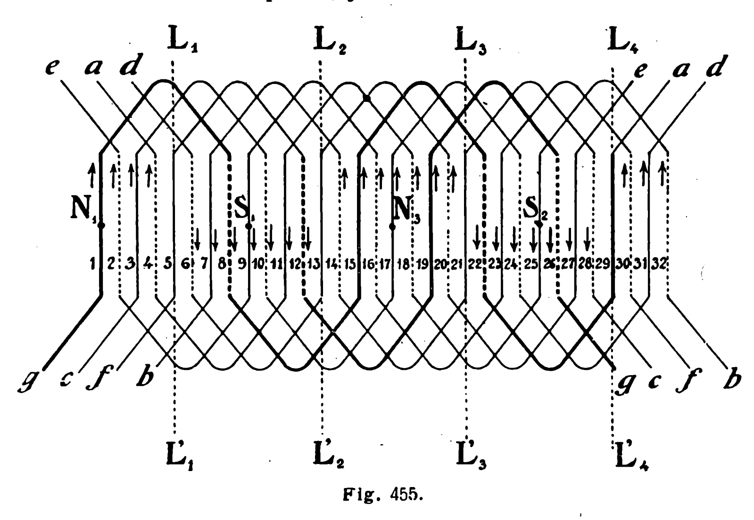


Fig. 455.

las cuatro líneas neutras. Las flechas representadas a lo largo de los conductores indican el sentido de las fuerzas electromotrices inducidas, sentido que cambia evidentemente entre dos líneas neutras. Es fácil ver que el devanado que consideramos está formado de cuatro partes en paralelo; en efecto, si se empieza por ejemplo en el conductor n.º 12 se encontrarán 8 conductores sucesivos en serie (12-19-26-1-8-15-22 y 29), lo cual se ve fácilmente observando que siguiendo estos

conductores en el orden indicado, se recorren en el mismo sentido de las flechas que indican el sentido de las fuerzas electromotrices.

A partir del conductor n.° 29, unido al 4, se encuentran ocho conductores recorridos en sentido inverso de las flechas, teniéndose por consiguiente otros ocho conductores en serie formando un grupo en oposición con el primero; después se recorre otro grupo de ocho conductores en el mismo sentido que las flechas, es decir, en oposición con el segundo; por último se recorre un cuarto grupo de ocho conductores en oposición con el tercero.

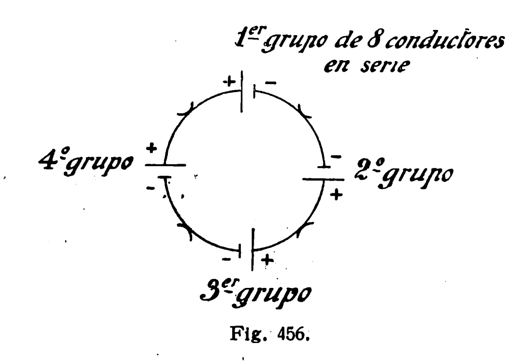


Fig. 456.

Se ve, pues, que se tendrán cuatro escobillas colocadas a 90° una de otra, y apoyándose en cada instante sobre las láminas de los colectores conectadas a los dos conductores que unen estos cuatro grupos y que son por consiguiente dos conductores consecutivos, en que las fuerzas electromotrices son de sentido inverso (fig. 456).

La fuerza electromotriz de la máquina será evidentemente, como en el caso de un inducido de tambor, independiente del número de polos inductores: $E = \frac{Nn\Phi}{10^8}$, y la corriente producida en el exterior será cuatro veces la corriente en el hilo del inducido.

IV.—Devanado ondulado en serie con pasos desiguales

Pueden realizarse devanados ondulados en serie con pasos desiguales, avanzando sucesivamente de



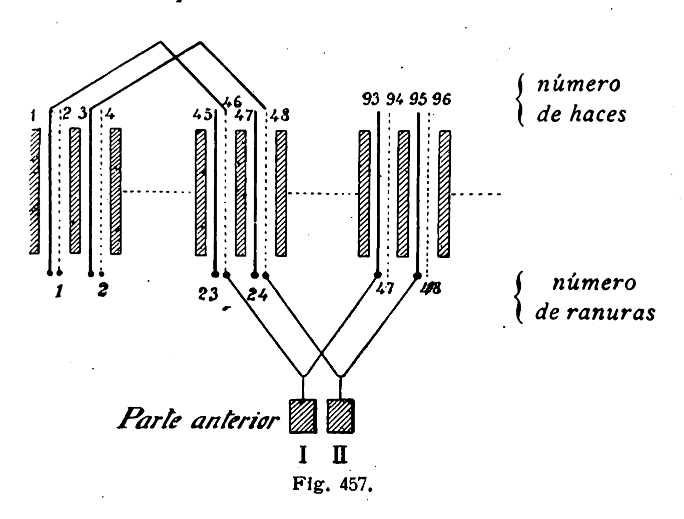


Fig. 457.

y_1 e y_2. En este caso, las igualdades (1) y (3) (págs. 566 y 567) subsisten, pero la igualdad (2) se convierte en esta otra:

$$\frac{y_1 + y_2}{2} d = D + e.$$

El número de conductores n se obtendrá sustituyendo en la fórmula correspondiente al caso de un paso único y, este paso y por $\frac{y_1 + y_2}{2}$, lo cual da:

$$n = 2p \frac{y_1 + y_2}{2} \pm 2,$$

es decir:

$$n = p\,(y_1 + y_2) \pm 2,$$

de donde:

$$y_1 + y_2 = \frac{n \pm 2}{p}.$$

Para que el devanado pueda efectuarse, es preciso que y_1 e y_2 sean ambos impares, y que $\frac{y_1 + y_2}{2}$ y $\frac{n}{2}$ sean primos entre sí.

Ordinariamente se toma $y_2 = y_1 + 2$.

EJEMPLO. — Máquina de cuatro polos:

$$p = 2, \qquad y_1 + y_2 = 92.$$

El número de conductores es:

$$n = 2 \times 92 \pm 2,$$

es decir, 186 ó 182, y se tomará, por ejemplo, $y_1 = 45$, $y_2 = 47$.

El devanado tendrá por consiguiente 93 carretes para $n = 186$, y alojando dos haces de conductores en cada ranura, la armadura del inducido tendrá 93 ranuras, siendo también 93 el número de láminas del colector.

Para realizar el devanado, las secciones deben unir, sobre la cara de atrás de la armadura (cara opuesta al colector), los haces: 1-46, 3 48, 5-50, etc. El primer carrete 1-46 se coloca en las ranuras 1 y 23; el carrete siguiente, 3-48, se coloca en las ranuras 2 y 24; el carrete 5-50 en las ranuras 3 y 25, y así sucesivamente.

Una vez colocados los carretes, se une el fin del primero, es decir, el extremo del haz 46, con una lámina del colector y esta misma lámina I del colector

se une al extremo del haz 46 + 47 = 93; el extremo del haz 48 del carrete siguiente, 3-48, se une al extremo del haz 48 + 47 = 95 y estos dos extremos se unen con la lámina II del colector, y así sucesivamente (fig. 457).

V.—Devanado en paralelo con pasos desiguales

Lo mismo que hemos dicho al tratar del devanado en serie, se pueden realizar devanados en paralelo con pasos desiguales y_1, y_2 (siendo y_1 e y_2 impares); se

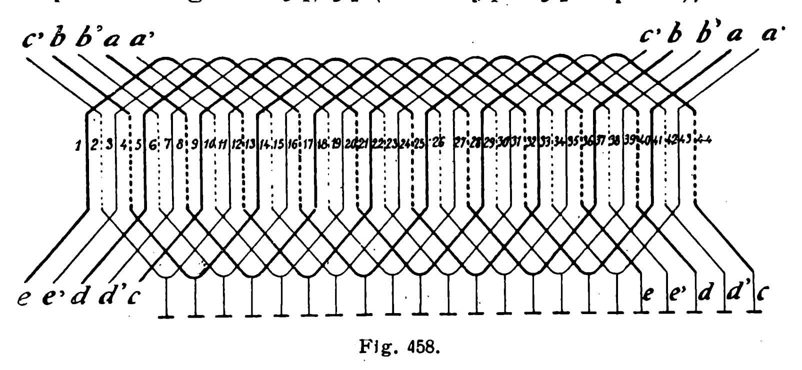


Fig. 458.

obtendrá la fórmula que da el número de conductores sustituyendo en la correspondiente de la página 567, y por $\frac{y_1 + y_2}{2}$, lo cual da:

$$n = p\,(y_1 + y_2) \pm 2\,p.$$

EJEMPLO:

Dinamo de 4 polos: $2\,p = 4$
44 conductores: $n = 44$.

Se tiene:

$$y_1 + y_2 = \frac{n \pm 2\,p}{p} = \frac{44 \pm 4}{2},$$

o sea:

$$y_1 + y_2 = 20, \qquad \text{o} \qquad y_1 + y_2 = 24.$$

Tomemos $y_1 + y_2 = 20$, e $y_1 = 11$, $y_2 = 9$, y tendremos el esquema representado en la figura 458. Las conexiones entre los conductores se establecen en el orden siguiente: 1-12, 12-21, 21-32, 32-41, 41-8,...

Siguiendo estos conductores en el orden indicado, se ve que se obtiene un circuito cerrado con la mitad de los conductores. Este primer circuito está señalado con líneas de trazo grueso. Se tiene otro circuito partiendo del conductor 3 y uniendo los conductores en el orden siguiente: 3-14, 14-23, 23-34, 34-43, 43-10, etc.

Estos dos circuitos están evidentemente montados en paralelo, y como cada uno de ellos está formado, como hemos visto, de dos partes en paralelo, los conductores del inducido forman cuatro grupos en paralelo.

Las cuatro escobillas deben ser bastante anchas para apoyarse sobre tres láminas del colector. Como se ve, todo sucede como si se tuvieran dos máquinas montadas en paralelo.

VI.—Devanado en serie paralelo

Cuando la corriente que ha de producir la máquina es muy elevada y en cambio la fuerza electromotriz puede ser débil, se emplean los devanados serie paralelo.

Se trata de realizar un devanado que en una armazón de $2p$ polos tenga $2q$ partes en oposición, estando $2q$ comprendido entre cero y $2p$. Cada parte en oposición comprenderá evidentemente $\frac{n}{2q}$ conductores en serie, siendo n el número total de conductores. Será preciso, por consiguiente, que partiendo de un conductor situado bajo un polo, se llegue otra vez bajo un

polo cuando se hayan recorrido $\frac{n}{2q}$ conductores, de donde se deduce, empleando las mismas notaciones anteriores:

$$\frac{n}{2q} e = D, \qquad \text{o sea} \qquad 2\,q\,D = ne. \tag{3}$$

Las otras dos relaciones:

(1) $$2\,p\,D = nd$$
(2) $$yd = D \pm e$$

siguen sin alteración.

Dividiendo las igualdades (3) y (1) miembro a miembro, se tiene:

$$\frac{q}{p} = \frac{e}{d}, \qquad \text{o sea} \qquad d = \frac{pe}{q}.$$

Sustituyendo este valor de d en la igualdad (1), se tiene:

$$2\,p\,D = \frac{npe}{q},$$

de donde:

$$D = \frac{ne}{2\,q}.$$

Sustituyendo en (2) D y d por sus valores respectivos, se tendrá:

$$y \times \frac{pe}{q} = \frac{ne}{2q} \pm e,$$

o bien:

$$2\,py = n \pm 2\,q,$$

de donde:

$$n = 2\,py \pm 2\,q \qquad \text{e} \qquad y = \frac{n \pm 2\,q}{2\,p}.$$

Si el devanado es de dos pasos desiguales:

$$n = p\,(y_1 + y_2) \pm 2\,q \qquad \text{e} \qquad y_1 + y_2 = \frac{n \pm 2\,q}{p}.$$

Ejemplo. — Dinamo de doce polos:

$$2p = 12,$$

devanado de barras y por consiguiente un conductor por haz. Número de barras, $n = 1408$.

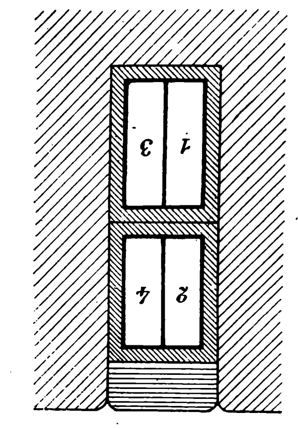


Fig. 459.

El devanado debe tener ocho partes en oposición:

$$2q = 8, \quad y_1 + y_2 = \frac{1408 \pm 8}{6},$$

lo cual da, tomando el signo +:

$$y_1 + y_2 = \frac{1416}{6} = 236;$$

por lo tanto se tomará:

$$y_1 = 119, \qquad y_2 = 117.$$

Si el número de láminas del colector es $\frac{1408}{2} = 704$ y el número de ranuras $\frac{704}{2} = 352$, se alojarán cuatro barras en cada ranura.

Haciendo el esquema del devanado como en el caso de devanado en serie, se vería fácilmente que el inducido está formado de dos circuitos distintos cerrados sobre sí mismos, en paralelo, estando cada uno de ellos formado de cuatro partes en paralelo.

Las conexiones entre las barras se hacen del modo siguiente: la barra 1 se une por la cara de atrás de la armadura a la barra n.° 120 (119 + 1), y el otro extremo de ésta, a una lámina del colector, unida a su vez a la barra 237 (120 + 117); la barra 3 a la barra 122 (119 + 3), y ésta a una lámina del colector sobre la cual está

fijada la barra 239 (237 + 2 ó 122 + 117), y así sucesivamente (fig. 460).

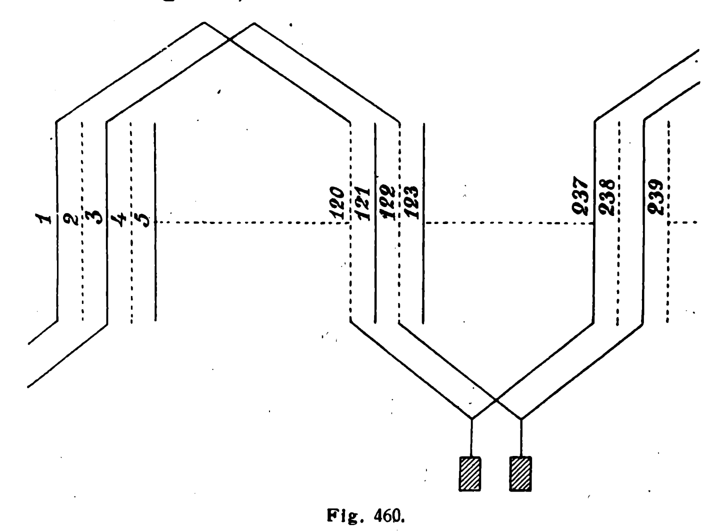


Fig. 460.

Las barras 1 y 3 se alojarán en el fondo de la ranura I y las barras 2 y 4 por encima de las primeras, en la misma ranura (fig. 459).

B) Máquinas de corriente alterna

I.—Devanado de los inducidos de los alternadores

La teoría de este devanado ya se ha expuesto en la página 436.

Pueden seguirse varios procedimientos, de los cuales indicaremos algunos que permitirán comprender todos los demás.

Devanados monofásicos. — El devanado está definido por el número de ranuras por polo, y por el número de conductores por ranura. Puede realizarse

un devanado ondulado, o un devanado imbricado y ondulado.

EJEMPLO I. — *Devanado ondulado con ocho polos y tres ranuras por polo* (fig. 461). — Se ve fácilmente que todos los conductores están montados en serie; los extremos del circuito formado están unidos a dos bornes B y B' si el inducido es fijo y la corona inductora móvil.

Si el inducido fuera móvil, estos extremos estarían unidos a dos anillos.

En el caso de que el devanado esté formado por barras, un elemento del devanado estará constituído por el grupo MNP. Si estuviera formado por hilos, los haces de los carretes se colocarían en las ranuras y un elemento estaría formado por un carrete tal como MNP, con sus extremos conectados a otros dos carretes, uno de los cuales es RTV, como indica la figura.

EJEMPLO II. — *Devanado imbricado y ondulado con ocho polos y dos ranuras por polo.* — Este devanado puede efectuarse con las dos disposiciones de las barras o de los carretes representadas en las figuras 462 y 463.

Devanados polifásicos. — Se obtienen devanados trifásicos agrupando tres devanados monofásicos sobre una misma armazón, estando desviados los carretes de cada grupo unos respecto a otros de un tercio de período, es decir, de un ángulo igual a $\frac{2\pi}{3p}$, siendo $2p$ el número de polos.

Los devanados bifásicos están formados por dos devanados monofásicos desviados de un cuarto de período, o sea del ángulo $\frac{2\pi}{4p}$.

EJEMPLO I. — *Devanado trifásico, ondulado, ocho*

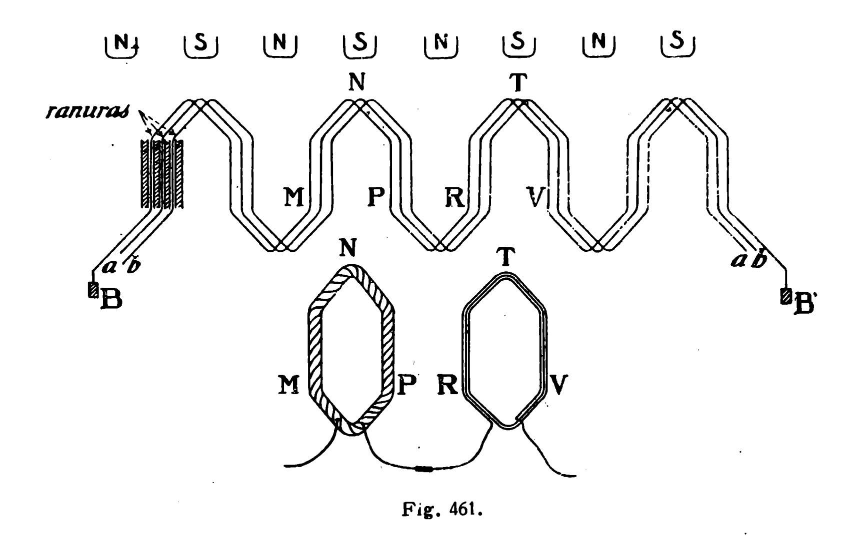


Fig. 461.

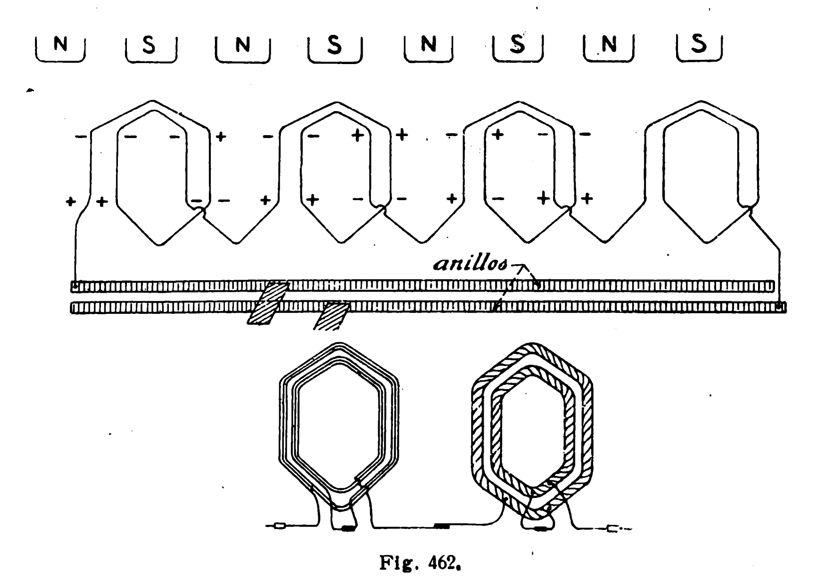
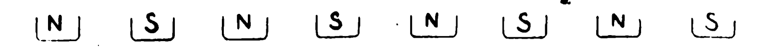


Fig. 462.



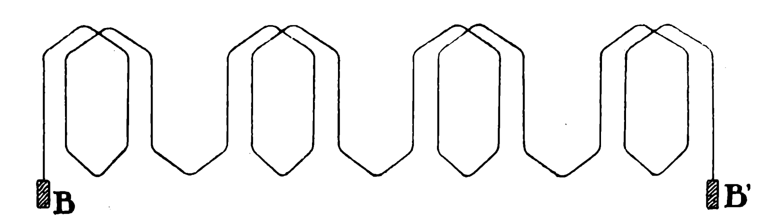


Fig. 463.

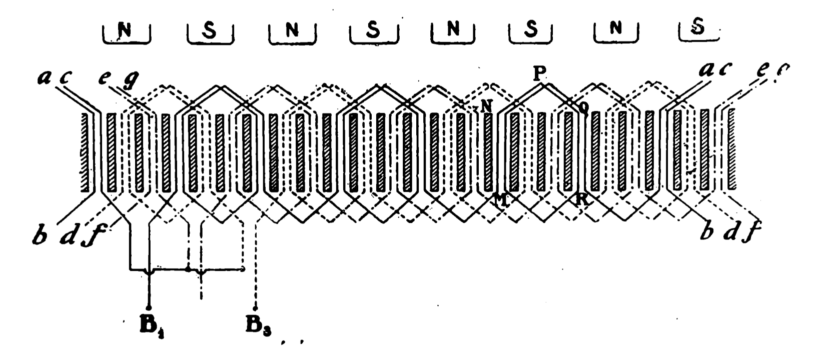


Fig. 464.

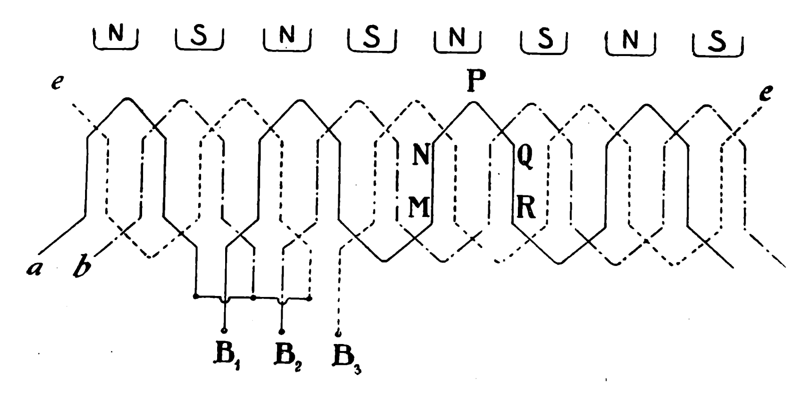


Fig. 465.

polos, una ranura por polo y por fase. Acoplamiento en estrella (fig. 464).

EJEMPLO II. — *Devanado imbricado y ondulado, ocho polos, una ranura por fase y por polo, dos haces de carretes o dos barras en cada ranura.* Acoplamiento en paralelo (fig. 465). — Cada elemento *MNPQR* representa un grupo de dos barras *MN*, *QR* o un carrete formado de varios hilos, cuyos haces son *MN* y *QR*. Los extremos de estos conductores están unidos como indican las figuras.

B_1, B_2, B_3 están unidos a tres bornes si el inducido es fijo, o a tres anillos si el inducido es móvil.

II.—Devanado de los motores

Devanado del estator. — Estos devanados se hacen como los de inducidos de alternadores.

EJEMPLO. — Sea un devanado que tiene que produ-

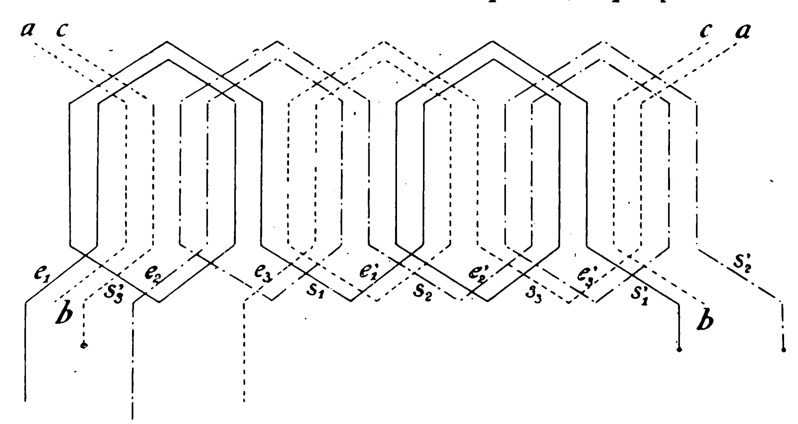


Fig. 466.

cir un campo giratorio de cuatro polos, con dos ranuras por polo y por fase, es decir, con veinticuatro ranuras (fig. 466).

Habrá dos carretes por fase: para la primera fase las entradas de estos dos carretes están indicadas en la figura en e_1 y e'_1 y sus salidas en s_1 y s'_1; la entrada e_1 está unida a un borne del estator; s_1 está conectada con la entrada e'_1 y la salida s'_1 está unida al centro de la estrella.

Las mismas conexiones se establecen para los otros dos grupos de dos carretes correspondientes a las otras dos fases, estando representadas las entradas y salidas para la segunda fase por e_2, s_2 y e'_2, s'_2 respectivamente, y e_3, s_3, e'_3, s'_3 representan las entradas y salidas para la tercera fase.

Devanado de los rotores.— El número de entalladuras del rotor no es el mismo que el del estator, para evitar las variaciones bruscas de flujo.

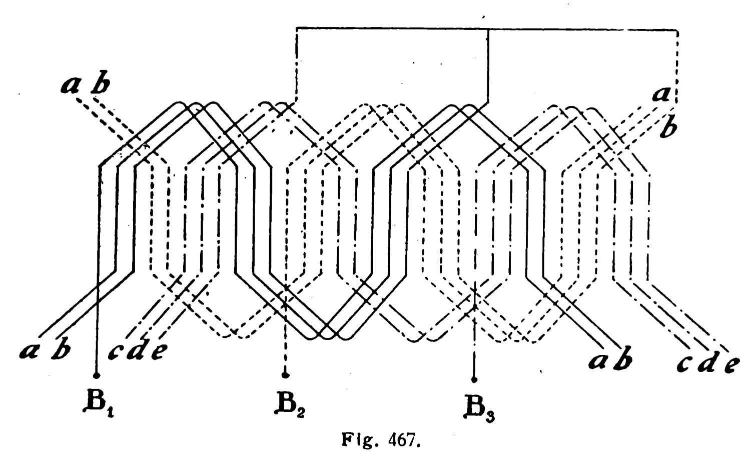


Fig. 467.

Devanado de los rotores de anillo.— Estos devanados pueden ser imbricados u ondulados y se pueden hacer con barras o con hilos.

Se devanan en trifásico, cualquiera que sea el número de fases de las corrientes que alimentan

el estator. Se toma generalmente el número de entalladuras de modo que los números de entalladuras del estator y del rotor, de una parte por polo y por fase, y de otra parte por polo, sean primos entre sí.

EJEMPLO. — Hay que devanar un motor de cuatro polos (ejemplo de la pág. 588, fig. 466) cuyo estator tiene dos ranuras por polo y por fase; si tomamos para el rotor tres entalladuras por polo y por fase,

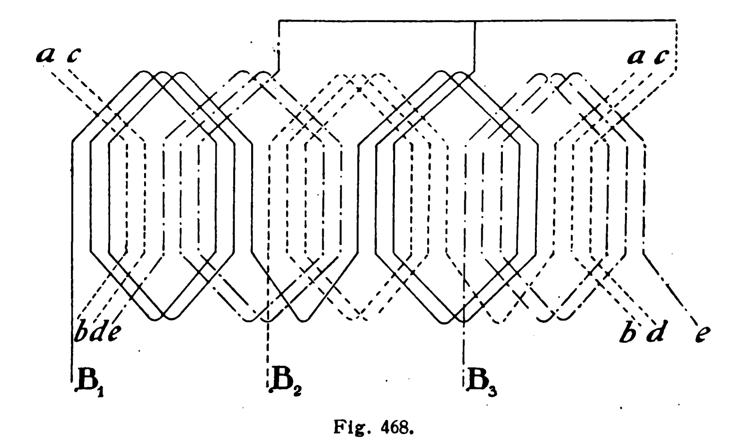


Fig. 468.

estos dos números 2 y 3 son primos entre sí. Pero el estator tiene 8 ranuras por polo y el rotor 12: estos dos números 8 y 12 no son primos entre sí, luego habrá que tomar 11 ranuras por fase para el rotor, por ejemplo, o sea 33 ranuras. Así se tendrá por fase: tres grupos consecutivos de tres ranuras y uno de dos ranuras.

Las figuras 467 y 468 representan el devanado imbricado y el devanado ondulado respectivamente.

EJERCICIOS

I. Una bomba centrífuga cuyo tubo de aspiración tiene una altura de 5 metros, eleva 130 metros cúbicos de agua por hora, a una altura de 160 metros sobre el nivel del agua. Un manómetro colocado sobre el tubo de retroceso a la salida de la máquina indica una presión de 16 atmósferas. Sabiendo que el rendimiento

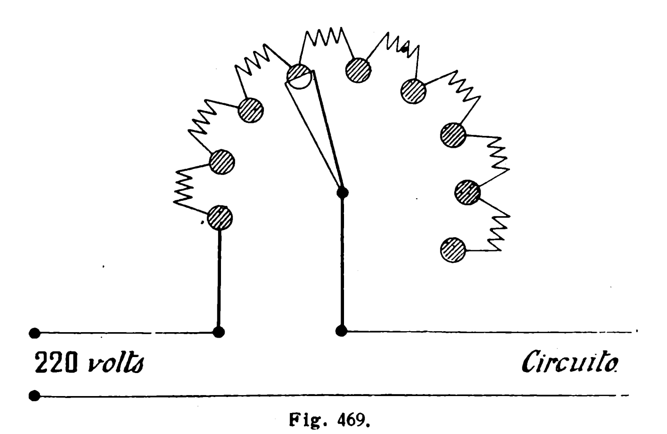


Fig. 469.

del grupo motor-bomba es de 66 por 100, calcular en caballos y en kilowatts la potencia gastada por el motor; calcular la pérdida de carga en la tubería y la potencia perdida correspondiente.

II. Un circuito es recorrido, bajo una tensión de 200 volts, por una corriente de 50 amperes. Calcular un reostato de hilo de maillechort, que intercalado

en el circuito, reduzca la corriente a 10 amperes y que su temperatura no pase de 100° sobre la ambiente.

Resolveremos este ejercicio explicando la teoría en que se funda y hallando la solución del mismo como aplicación del caso general.

Sabemos que la energía absorbida por un reostato colocado en un circuito se transforma en calor. Una parte de este calor se emplea en elevar la temperatura de los conductores que constituyen el reostato, la otra parte se disipa por radiación y convección en el medio ambiente.

El calor disipado es tanto más grande cuanto mayor es la superficie de contacto con el aire y cuanto mayor es el exceso de la temperatura de las resistencias sobre la temperatura exterior. Se puede admitir que el calor disipado es proporcional a esta superficie y a este exceso de temperatura.

Al empezar a funcionar el reostato, la temperatura se eleva rápidamente, y el calor disipado aumenta hasta que la cantidad de calor producida por efecto Joule sea toda radiada. En este momento la temperatura permanece estacionaria.

Sean:

d, el diámetro, expresado en milímetros, del hilo empleado;

l, su longitud, expresada en metros;

a, la resistividad del metal, en microhms-centímetro;

R, la resistencia del reostato en ohms.

Supongamos que son C calorías el calor disipado por radiación y convección por centímetro cuadrado de superficie de contacto con el aire por grado de exceso sobre la temperatura ambiente.

T, la elevación de temperatura sobre la del ambiente;

I amperes, la corriente en el reostato.

La cantidad de calor producida por la corriente en el reostato en un segundo es:

$$0{,}24 \times RI^2 \text{ calorías.}$$

La superficie de contacto del conductor con el aire es:

$$\pi \times \frac{d}{10} \times 100\, l = 10\, \pi d l \text{ centímetros cuadrados.}$$

La cantidad de calor disipada por segundo es:

$$10\, \pi d l \times CT \text{ calorías.}$$

Por consiguiente:

(1) $$0{,}24\, RI^2 = 10\, \pi d l CT.$$

Además se tiene:

$$R = \frac{a}{100} \times \frac{l}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4\, al}{100\, \pi a^2},$$

de donde:

$$100\, R\, \pi\, d^2 = 4\, al$$

(2) $$l = \frac{100\, R\, \pi\, d^2}{4\, a}.$$

Sustituyendo este valor de l en la igualdad (1) se tiene:

$$0{,}24\, RI^2 = 10\, \pi d\, \frac{100\, R\, \pi\, d^2}{4\, a}\, CT,$$

o sea:

$$4 \times 0{,}24\, aI^2 = 1000\, \pi^2\, CTd^3$$

$$d^3 = \frac{4 \times 0{,}24\, aI^2}{1000\, \pi^2\, CT}$$

(3) $$d = \frac{1}{10} \sqrt[3]{\frac{4 \times 0{,}24\, aI^2}{\pi^2 \cdot CT}} \text{ milímetros.}$$

La longitud del hilo que constituye el reostato se calcula por la fórmula (2) en que l está expresada en metros.

El valor de C depende de la naturaleza del metal; la tabla siguiente da este valor para varios metales y aleaciones:

Cobre.	0,0007
Hierro	0,0006
Plomo.	0,0002
Niquelina	0,00015
Maillechort.	0,0003.

Resolvamos ahora el ejercicio propuesto: para el maillechort se tiene:

$$C = 0{,}0003 \qquad \text{y} \qquad a = 30.$$

La fórmula (3) da:

$$d = \frac{1}{10}\sqrt[3]{\frac{0{,}96 \times 30 \times 10^2}{3{,}14^2 \times 0{,}0003 \times 100}} = 2{,}1.$$

Tomaremos, pues, un hilo de $\frac{21}{10}$ mm. de diámetro.

La resistencia del circuito considerado es R, dada por la relación

$$220 = R \times 50, \qquad \text{de donde} \qquad R = \frac{220}{50};$$

por consiguiente, el reostato deberá tener una resistencia total r tal, que:

$$220 = (R + r)\ 10$$

$$R + r = \frac{220}{10} = 22$$

$$r = 22 - \frac{220}{50} = \frac{110 - 22}{5} = 17{,}6 \text{ ohms.}$$

La longitud del hilo será:

$$l = \frac{100 \times 17,6 \times 3,14 \times 2,1^2}{4 \times 30} = 203 \text{ metros.}$$

Si se quiere que esta reducción de 50 a 10 amperes se haga de 5 en 5 amperes, se dividirá esta resistencia en 9 partes mediante contactos sobre los cuales se apoyará sucesivamente la manivela.

Observación. — Se obtendrá en general un reostato convenientemente calculado, tomando para CT el valor 0,05 para un reostato bien ventilado y 0,03 para un reostato poco ventilado.

III. *Cálculo de un fusible.* — Hay que determinar el diámetro d en milímetros, de un hilo metálico que debe fundirse cuando la corriente que lo recorra sea de I amperes.

Admitiremos que la longitud del hilo es suficiente para que el enfriamiento por las masas de los contactos de fijación no alcance a su punto medio. Sea t la temperatura ambiente, T el punto de fusión del metal, C la cantidad de calor disipada por centímetro cuadrado y por grado de exceso sobre la temperatura ambiente.

La igualdad siguiente indica que la cantidad de calor producida por la corriente I amperes alcanza un valor tal, que la temperatura del hilo es la de su fusión:

$$0,24\, RI^2 = 10\, \pi d l C\, (T - t)$$

y como

$$R = \frac{4\, al}{100\, \pi d^2},$$

$$0,24 \times \frac{4\, al}{100\, \pi d^2} I^2 = 10\, \pi d l C\, (T - t),$$

$$I^2 = \frac{1000\, \pi^2 C\, (T - t)}{0,24 \times 4\, a} d^3,$$

y despreciando t por ser muy pequeña respecto a T,

$$I^2 = \frac{1000\,\pi^2\,CT}{0{,}24 \times 4\,a}\,d^3.$$

Ahora bien, C, T y a son cantidades que dependen exclusivamente de la naturaleza del metal o de la aleación de que está hecho el hilo fusible, es decir, que la cantidad

$$\frac{1000\,\pi^2\,C\,T}{0{,}24 \times 4\,a}$$

es una constante que puede determinarse experimentalmente para cada metal o aleación; luego designando por K esta constante, se tiene:

$$d^3 = \frac{I^2}{K}.$$

IV. Un circuito de alumbrado, alimentado bajo una tensión de 110 volts, es recorrido por una corriente de 12 amperes. Calcular:

1.° La cantidad de electricidad expresada en coulombs y en ampere-horas, que recorre el circuito al cabo de tres horas de funcionamiento;

2.° La potencia absorbida por las lámparas, expresada en watts y en hectowatts;

3.° La energía expresada en joules, watt-horas y hectowatt-horas, consumida durante estas tres horas y el precio a que resultaría el alumbrado si la energía costase a 8 céntimos por hectowatt-hora.

V. Un motor desarrolla sobre su polea una potencia de 5 caballos y su rendimiento es 85 por 100. La tensión aplicada entre sus bornes es 110 volts.

Determinar:

1.° La corriente en los conductores que lo unen al generador;

2.º La energía perdida en una hora, expresada en hectowatt-horas y en calorías;

3.º El precio por hora de la energía total absorbida, de la energía utilizada y de la energía disipada en forma de calor en el motor, sabiendo que esta energía cuesta a 5 céntimos el hectowatt-hora.

VI. Una línea de cobre tiene 10 kilómetros de longitud y $\frac{15}{10}$ de milímetro de diámetro; ¿cuál es su resistencia?

¿Cuál es la relación entre el peso de esta línea y el peso de una línea de aluminio de la misma longitud y de la misma resistencia?

Densidad del cobre: 8,8. Densidad del aluminio: 2,56.

VII. Un carrete tiene un diámetro interior de 50 milímetros y una altura de 20 centímetros. Está devanado con un hilo de cobre de $\frac{15}{10}$ de milímetro de diámetro, sin contar el aislamiento, y de $\frac{20}{10}$ con el aislamiento. La resistencia del circuito así formado es de 16 ohms.

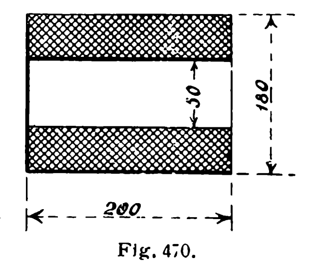


Fig. 470.

Calcular la longitud del hilo y el número de espiras.

VIII. La temperatura del inducido de una dinamo, en frío y parada, es de 15°, siendo su resistencia entonces de 0,50 ohm. En marcha se eleva su resistencia a 0,595 ohm.

Calcular cuál es entonces la temperatura del inducido.

IX. Determinar la distancia a que se puede transportar la energía eléctrica, bajo una tensión de utilización de 110 volts, con un peso de cobre de 250 gramos por watt transmitido y una caída de tensión en la línea de 5 por 100.

X. Demostrar que para una potencia dada que hay que transportar a una distancia dada, admitiendo la misma caída de tensión en tanto por ciento, las secciones de los conductores son inversamente proporcionales a los cuadrados de las tensiones empleadas.

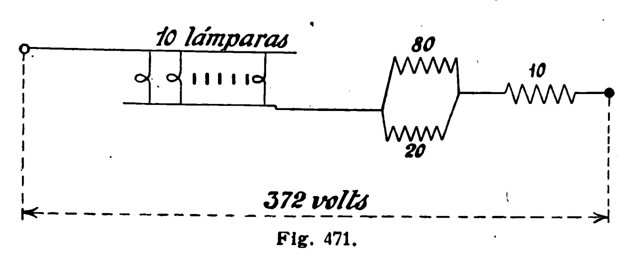


Fig. 471.

XI. Demostrar que a igualdad de tensión y de potencia transportada a diferentes distancias con la misma caída relativa de tensión, los pesos de los conductores son proporcionales a los cuadrados de las distancias.

XII. Un circuito comprende, en serie (fig. 471):

1.° Un grupo de 10 lámparas: 120 volts, 25 bujías, 1,2 watts por bujía;

2.° Un grupo de dos conductores que tienen por resistencias, uno 80 y el otro 20 ohms;

3.° Un conductor de resistencia de 10 ohms.

Se aplica entre los extremos de este circuito una tensión de 372 volts.

Calcular la corriente en cada conductor y en cada lámpara y la tensión entre los extremos de cada grupo.

XIII. Tres lámparas A, B, C tienen las características dadas en el cuadro siguiente:

Lámparas	Consumo en watts por bujía	Tensión de régimen	Intensidad luminosa bajo la tensión de régimen
A	1 watt	30 volts	60 bujías
B	1,2 »	30 »	25 »
C	1,5 »	30 »	10 »

1.° Se montan estas tres lámparas en serie bajo una tensión de 90 volts.

Estudiar el funcionamiento de cada una de ellas y calcular su sobrevoltaje o devoltaje;

2.° De qué manera habría que shuntarlas para que funcionaran las tres normalmente;

3.° Se quiere alimentar estas lámparas en paralelo bajo 50 volts; calcular la resistencia que habría que poner en serie para que dieran las intensidades luminosas indicadas.

Fig. 472.

XIV. Un galvanómetro de resistencia g está unido a dos puntos A y B entre los cuales hay una tensión de u volts, por intermedio de resistencias r_1 y r_2 ohms y de shunts s_1, s_2 ohms dispuestos como indica la figura 472. Calcular la corriente en el galvanómetro.

XV. Dos pilas P_1 y P_2 tienen respectivamente por fuerzas electromotrices 1 y 1,8 volts y por resistencias interiores 0,8 y 0,2 ohms, y están cerradas sobre conductores dispuestos como indica la figura 473 y cuyas resistencias son: $r_1 = 1,2$, $r_2 = 0,8$, $r_3 = 2$ ohms.

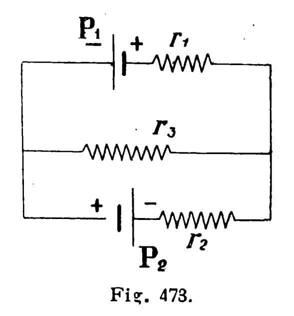


Fig. 473.

Calcular las corrientes i_1, i_2, i_3 en cada conductor.

XVI. Un taller utiliza un motor que desarrolla en su polea una potencia de 10 caballos, siendo su rendimiento de 90 por 100, y dos motores que desarrollan una potencia útil de 5 caballos cada uno, con un rendimiento de 85 por 100.

Este taller está iluminado por 100 lámparas de 25 bujías cada una, de 1,2 watts por bujía. La instalación debe alimentarse bajo 120 volts, por un generador situado a 100 metros de distancia, cuya resistencia interior es de 0,02 ohm.

¿Cuál debe ser la sección del conductor que hay que emplear para que la pérdida de potencia en la línea sea igual al 10 por 100 de la potencia total utilizada?

¿Cuál es la tensión en los bornes de las lámparas cuando los motores no se utilizan y en cuánto habría que reducir la fuerza electromotriz del generador para que esta tensión fuera igual a 120 volts?

XVII. Un generador que tiene una resistencia interior $\rho = 0,05$ ohm, desarrolla una fuerza electromotriz $E = 110$ volts. De sus bornes parten dos conductores de cobre de 30 metros de longitud y de 5 milímetros de diámetro que van a parar a un grupo de lám-

paras de incandescencia que tienen una resistencia combinada de 2 ohms. Un electromotor de resistencia interior $r = 0{,}5$ ohm y en que se produce una fuerza contraelectromotriz de 100 volts está derivado sobre la línea, en el punto medio de su longitud por medio de conductores de resistencia despreciable (fig. 474).

Calcular:

1.° La intensidad I de la corriente producida por el generador, y las intensidades i, i' de las corrientes absorbidas por el motor y por las lámparas;

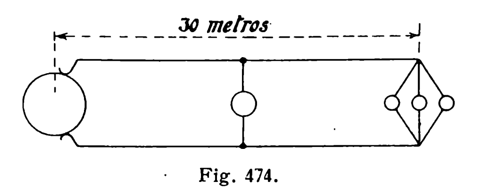


Fig. 474.

2.° Las diferencias de potencial V, v, v' que existen respectivamente en los bornes del generador, en los bornes del motor y en el extremo de la línea;

3.° La potencia eléctrica total producida por el generador, la potencia tomada por el motor, la utilizada por el grupo de lámparas y la perdida en la línea.

(ERIC GERARD y OMER DE BAST, *Ejercicios de Electrotecnia.*)

XVIII. En un taller hay varios motores que absorben 30 kilowatts, y 300 lámparas de 25 bujías, de 1,2 watt por bujía. La fuerza motriz y la luz están alimentadas bajo una tensión de 150 volts por una pequeña central situada a 250 metros de distancia. Los conductores están calculados de modo que en plena carga la energía perdida en la línea sea igual al 10 por 100 de la energía utilizada. Se quiere instalar en la central una batería de acumuladores que permita asegurar el

alumbrado durante el paro de la dinamo en las condiciones siguientes: durante dos horas diarias la batería alimentará todas las lámparas, durante las dos horas siguientes la cuarta parte, y durante tres horas después la décima parte de las lámparas instaladas.

Calcular según los datos:

1.° El número de elementos de la batería, supo-

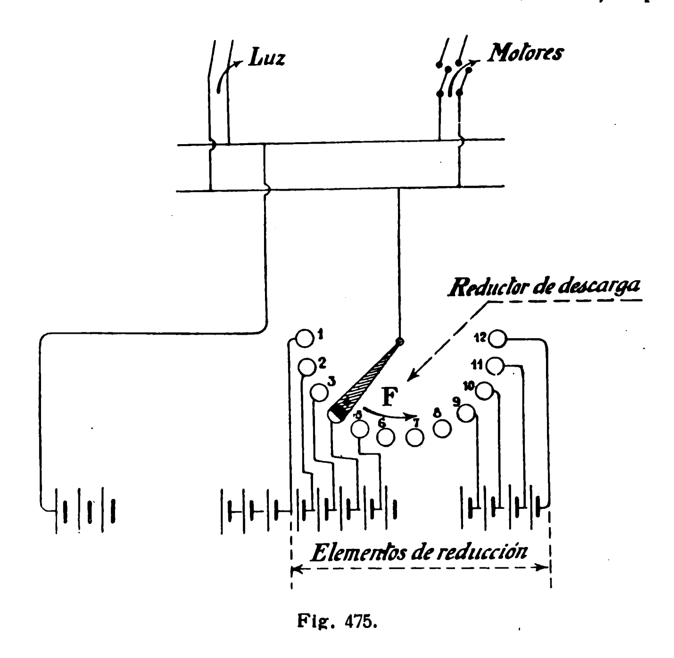


Fig. 475.

niendo despreciable su resistencia interior. Este número deberá ser suficiente para que las lámparas estén sometidas a la tensión normal de 150 volts hacia el fin de la descarga;

2.° El número de elementos que habrá que suprimir cuando la batería se haya cargado demasiado, para que las lámparas no soporten una tensión excesiva. Estos *elementos de reducción* se van agregando,

por medio de un *reductor de descarga,* a medida que la batería se descarga;

3.º El régimen de la batería, admitiendo que puede producir, por posibles adiciones ulteriores, una corriente de 50 por 100 superior a la que necesitan las 300 lámparas;

4.º Al cabo de unas cuantas horas de haberse recargado completamente la batería, deberá recargarse de nuevo, admitiendo que cuando produce su corriente de régimen, se descarga en diez horas.

Después de la carga la manivela debe estar sobre el contacto 1 y se avanza poco a poco en el sentido de la flecha *F*, a medida que la batería se descarga, debiendo estar sobre el contacto 12 cuando la fuerza electromotriz de los elementos ha quedado reducida a 1,8 volts (figura 475).

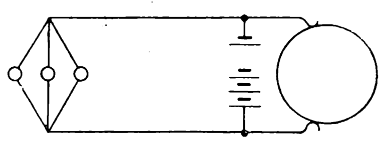


Fig. 476.

XIX. Una dinamo, cuya fuerza electromotriz media es de 110 volts, y cuya resistencia interior es 0,05 ohm, alimenta un circuito de alumbrado. Las irregularidades del motor que la hace funcionar, producen variaciones de esta fuerza electromotriz que alcanzan el 5 por 100 por encima o por debajo de su valor medio 110 volts.

Para evitar las variaciones de corriente que resultan en las lámparas, se monta en paralelo con la dinamo una batería de 52 elementos cuya fuerza electromotriz es constante e igual a 2 volts y cuya resistencia interior es 0,008 ohm. ¿Cuáles son entonces las variaciones de corriente en las lámparas? Comparar estas variaciones con las que se producirían si no hubiera la batería (fig. 476).

EQUIVALENTES QUÍMICOS DE ALGUNOS METALES

(en miligramos por coulomb)

Platino	1,009	Níquel	0,304
Oro	0,691	Hierro	0,2908
Plata	1,118	Plomo	1,0718
Cobre	0,3281	Zinc	0,3383
Aluminio	0,0935	Estaño	0,62

XX. Un cuerpo que tiene una superficie de 50 decímetros cuadrados se ha niquelado en dos horas con una corriente de 15 amperes. ¿Cuál es el espesor de la capa de níquel?

Densidad del níquel 8,5.

XXI. Se quiere instalar un taller de niquelado capaz de producir 2 kilogramos de níquel por día de doce horas de trabajo. ¿Qué intensidad debe producir el generador?

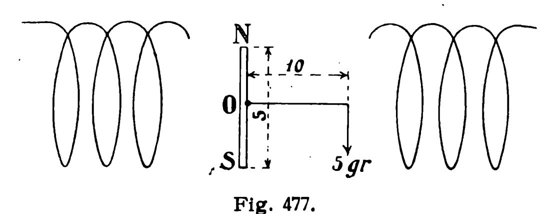


Fig. 477.

XXII. Un solenoide de gran longitud tiene 5 espiras por centímetro, recorridas por una corriente de 4 amperes. En su interior hay un imán de 5 centímetros de longitud orientado perpendicularmente al eje del solenoide. En el punto medio O de la barra imanada está fijado el extremo de una palanca de 10 centímetros de longitud, pudiendo moverse la barra juntamente con la palanca alrededor de un eje que pasa por O y es perpendicular al plano formado por el eje del solenoide y el de la barra (fig. 477).

1.° Estando el polo N del imán en la parte superior, como representa la figura, determinar el sentido de la corriente en el solenoide para que pueda mantenerse la barra en esta posición por medio de un peso colocado en el extremo de la palanca;

2.° Sabiendo que se consigue este resultado con un peso de 5 gramos, calcular el momento magnético de la barra y la masa magnética en cada polo.

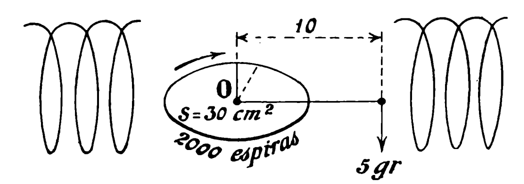


Fig. 478.

XXIII. Se sustituye esta barra imanada por un carrete plano de 2000 espiras limitando una superficie de 30 cm. cuadrados. Calcular la corriente que debe circular por este carrete para poder equilibrar un peso de 5 gramos. Determinar, después del sentido de la corriente en el carrete plano, el sentido que debe tener la corriente en el solenoide (fig. 478).

XXIV. Se forma, con láminas de hierro aisladas por papel, de las dimensiones indicadas en la figura 479, un paquete de 6 centímetros de espesor. El papel reduce a 85 por 100 el espesor útil del hierro.

Un carrete colocado del modo que representa la figura y cuyas espiras son recorridas por una corriente de 15 amperes, debe producir en el entrehierro de 1,5 cm. una inducción de 4000 gauss. Calcular el número de vueltas del carrete, sabiendo que el coeficiente de pérdida de flujo para el entrehierro es de 1,25,

XXV. Para medir la permeabilidad de una muestra de fundición por comparación con la de un patrón de hierro dulce, se coloca la barra patrón y una barra de las mismas dimensiones hecha con la fundición que se trata de ensayar, en carretes magnéticamente idén-

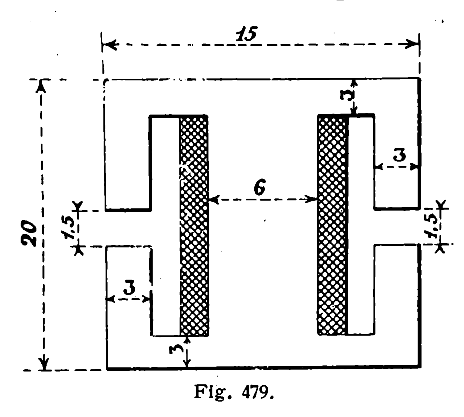


Fig. 479.

ticos, entre dos culatas macizas de hierro provistas de partes curvadas que forman un entrehierro entre dos extremos planos, colocados uno frente a otro, y orientados según el meridiano magnético (fig. 480).

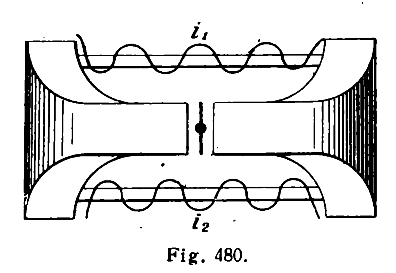


Fig. 480.

Se envían a los dos carretes corrientes cuyo sentido e intensidad se regula de modo que una aguja imanada móvil horizontalmente sobre un eje colocado en medio del entrehierro esté en equilibrio en la dirección del meridiano magnético.

Este resultado se consigue con barras de longitud $l = 15,7$ cm. y con carretes de 250 espiras cada uno, cuando las corrientes i_1 e i_2 que circulan alrededor de

la muestra y del patrón son respectivamente de 10 amperes y de 0,3 ampere. Determinar, con estos datos, la permeabilidad μ_1 de la muestra y la inducción magnética a que corresponde, si la relación entre la permeabilidad μ_2 y el campo magnético está dada por una curva que puede considerarse como una recta entre los puntos definidos por los pares de valores: $\mathcal{H}_2 = 5$ gauss, $\mu_2 = 2000$ y $\mathcal{H}_2 = 6.5$ gauss, $\mu_2 = 1700$.

XXVI. El inducido dentado de una dinamo de 8 polos está formado por láminas de 0,5 mm. de espesor, siendo el diámetro exterior de 80 cm. y el diámetro interior de 40 cm. La longitud de la armadura es de

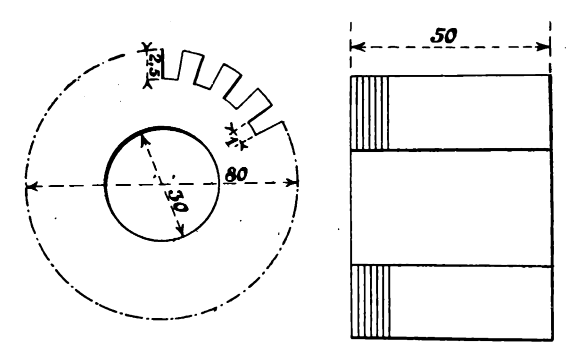


Fig. 481.

50 cm. Las muescas o huecos son 156, su profundidad es de 2,5 cm. y su anchura 1 cm. Este núcleo se somete a una inducción de 8000 gauss y gira con la velocidad de 500 vueltas por minuto.

El volumen del hierro queda reducido por el aislamiento de las láminas al 85 por 100 del volumen total del núcleo.

Calcular las pérdidas por histeresis y por las corrientes de Foucault.

XXVII. En el interior de un solenoide cuyas espiras limitan una superficie de 120 cm², se dispone un carrete plano rectangular cuyos lados tienen 8 y 5 cm. y que tiene 600 espiras de hilo fino, de manera que su plano sea perpendicular al eje del solenoide.

Los extremos de este carrete, cuya resistencia es de 10 ohms, se unen a los extremos de un galvanómetro balístico de 40 ohms de resistencia. Cuando se hace pasar bruscamente por las espiras del solenoide una corriente de 10 amperes, el galvanómetro indica una elongación de 20 centímetros.

Determinar con estos datos el coeficiente de autoinducción del solenoide, sabiendo que la elongación, es decir, la primera desviación de la parte móvil del galvanómetro, leída sobre una regla graduada, es proporcional a la cantidad de electricidad que la recorre y que una milésima de micro-coulomb produce una elongación de 10 centímetros.

XXVIII. Un voltímetro de resistencia 3000 ohms está graduado en volts.

Se quiere utilizar este voltímetro para una tensión diez veces mayor que la tensión para la cual se ha construído, y para ello se le pone una resistencia en serie. Calcular esta resistencia que reducirá su sensibilidad de una división por volt a una división por 10 volts.

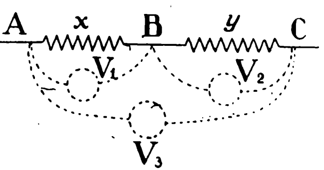


Fig. 482.

XXIX. Para medir dos resistencias x e y se ponen en serie, y se hace pasar por ellas una corriente. Se mide sucesivamente con un voltímetro de resistencia r ohms, la diferencia de potencial V_1 entre los extremos A y B de la primera;

después la diferencia V_2 entre los extremos B y C de la segunda, y por último, la diferencia de potencial V_3 entre los extremos A y C. Calcular x e y en función de r, V_1, V_2 y V_3 (fig. 482).

XXX. La resistencia de un amperímetro es 0,8 ohm y su shunt de 1 ampere es de 40000 microhms. ¿Cuál es la corriente en el amperímetro que produce la desviación correspondiente a toda la graduación de la escala?

XXXI. Un inducido está devanado en anillo (o en tambor, arrollamiento paralelo) con un hilo cuyo diámetro es 25 : 10; el número de espiras es 760. Se hace girar en una armazón de 4 polos a la velocidad de 500 vueltas por minuto y produce en un circuito exterior una corriente de 40 amperes bajo una diferencia de potencial de 100 volts.

La resistencia medida entre dos escobillas consecutivas (es decir, entre los dos polos de la máquina) es de 0,15 ohm. Calcular:

1.° La fuerza electromotriz desarrollada;

2.° El flujo inductor por polo;

3.° La densidad de la corriente en los hilos del inducido;

4.° La pérdida de energía en una hora por efecto Joule en el inducido;

5.° La longitud total del hilo utilizado en el devanado del inducido.

XXXII. Un generador serie debe producir 50 amperes bajo 220 volts, y la potencia perdida por efecto Joule en los circuitos inductor e inducido debe ser el 8 por 100 de la potencia total desarrollada. Calcular:

1.° La potencia total desarrollada por la máquina;

2.° La suma de las resistencias de los circuitos inductor e inducido;

3.° La fuerza electromotriz de la máquina.

(Se consideran como despreciables las pérdidas de energía que no sean debidas al efecto Joule.)

XXXIII. Un generador shunt produce 25 amperes bajo 500 volts. Las pérdidas son de 3,5 por 100 en el inducido y de 2,5 por 100 en el circuito inductor. Calcular:

1.° Las pérdidas de potencia en el inducido y en los electrodos;

2.° La corriente inductora;

3.° La resistencia del inducido;

4.° La resistencia del inductor;

5.° La fuerza electromotriz de la máquina.

XXXIV. Una dinamo compound puede producir 160 amperes bajo 220 volts. Las pérdidas por efecto Joule son: 1,6 por 100 en el inducido, 2 por 100 en el devanado shunt y 1,2 por 100 en el devanado serie. Calcular:

1.° La resistencia del devanado shunt, la del devanado serie y la del inducido;

2.° La corriente en el devanado shunt y la corriente en el inducido;

3.° La fuerza electromotriz de la máquina;

4.° El rendimiento eléctrico cuando la corriente es de 80 amperes.

XXXV. Un motor bipolar con excitación separada, desarrolla un par igual a 5 kilográmetros; el número de conductores periféricos sobre el inducido es de 300 y el flujo inductor por polo es $2{,}5 \times 10^6$ unidades C. G. S.

¿Cuál es la corriente en el inducido? ¿Qué tensión habrá que aplicar entre sus bornes para que su velocidad sea de 800 vueltas por minuto, siendo la resistencia del inducido igual a 0,15 ohm?

XXXVI. Un motor serie está alimentado bajo una tensión de U volts entre sus bornes; funciona sobre la primera parte rectilínea de su característica magnética; tiene 630 cables sobre la periferia del inducido; la resistencia de sus inductores es de 0,292 ohm y el rendimiento del motor es 0,894 a la velocidad de 600 vueltas por minuto.

Sabiendo que estando parado el inducido, y recorrido por una corriente de 68 amperes, presenta una tensión de 19,04 volts entre las escobillas y que a la velocidad de 600 vueltas desarrolla una potencia útil de 45 caballos con la misma corriente 68 amperes y levantando un peso de 43 kilogramos, se quiere calcular:

1.° La velocidad con la cual podrá levantar verticalmente el motor un peso de 43 kilogramos; 2.°, la potencia P que hay que comunicar al motor y la tensión V que habrá que aplicar entre sus bornes; 3.°, la fuerza contraelectromotriz y el flujo útil; 4.°, las pérdidas por efecto Joule en el inducido y en los inductores; 5.°, la suma total S de las pérdidas por frotamientos, histeresis y corrientes de Foucault; 6.°, valores que tomarían U y S si para la misma corriente y la misma intensidad las resistencias del inducido y del inductor y el número de espiras inductoras se hicieran dos veces menores.

(Se admite para esta última cuestión que el rendimiento conserva el mismo valor.)

XXXVII. Un motor shunt alimentado bajo una tensión constante $U = 100$ volts gira de vacío a la velo-

cidad de 1500 vueltas por minuto, absorbiendo una corriente inducida de 2,5 amperes. El reostato de excitación, de resistencia R_o, está entonces en corto-circuito. Sabiendo que en marcha normal la corriente inducida es de 50 amperes, calcular el valor que hay que dar a R_0 de modo que la velocidad permanezca igual a 1500 vueltas.

La resistencia del inducido es 0,5 ohm; la resistencia del inductor es 40 ohms y se supone que el inductor no está saturado.

XXXVIII. Entre los extremos de un circuito que comprende en serie un conductor de 100 ohms de resistencia sin auto-inducción y un conductor de resistencia despreciable cuyo coeficiente de auto-inducción es 0,5 henry, se aplica una tensión eficaz de 200 volts.

Calcular la corriente en estos conductores, el defasaje de la corriente sobre la tensión y la potencia absorbida.

Determinar qué valores toman estas magnitudes cuando se deriva un condensador de 10 microfarads de capacidad: 1.°, entre los extremos de la resistencia; 2.°, entre los extremos de la auto-inducción.

XXXIX. Entre los tres hilos de una distribución trifásica se mantiene una tensión eficaz de 110 volts.

a) Se derivan sucesivamente entre estos tres hilos:

1.° Un circuito de alumbrado que absorbe una potencia de 80 kilowatts cuyas tres fases están igualmente cargadas y montadas en triángulo;

2.° Una distribución de fuerza motriz que absorbe una potencia de 200 caballos y cuyo factor de potencia es 0,7.

Calcular para cada caso las corrientes en las líneas.

b) ¿Qué valor tendrán estas corrientes cuando las

dos distribuciones funcionen simultáneamente y cuál será el factor de potencia del sistema?

XL. El núcleo de un transformador tiene una sección de 80 centímetros cuadrados y la longitud de la línea de fuerza media es de 90 centímetros.

El primario tiene 150 espiras y el secundario 3000. En los bornes del primario hay aplicada una tensión eficaz de 110 volts; frecuencia, 50.

El conjunto de uniones o juntas entre las láminas corresponde a un entrehierro de 0,02 centímetro. El espesor de las láminas es de 0,5 milímetro.

Calcular: 1.°, la tensión secundaria; 2.°, el flujo y la inducción, sabiendo que el coeficiente de permeabilidad es 2500; 3.°, la corriente magnetizante (en vacío); 4.°, la pérdida de potencia por histeresis, sabiendo que el coeficiente de Steinmetz de las láminas es 0,002, y que con láminas cuyo coeficiente de Steinmetz es 0,003, para la misma inducción y la frecuencia 100, la pérdida de potencia es de 40 watts por decímetro cúbico; 5.°, la pérdida por corrientes de Foucault.

XLI. Un motor sincrónico monofásico de 4 polos, de resistencia despreciable y de reactancia constante, es alimentado a la tensión constante de 120 volts eficaces por una corriente de frecuencia 40; el par motor es de 3 kilográmetros. Se da a la excitación un valor tal, que el defasaje de la corriente sobre la tensión en los bornes sea cero; la fuerza contraelectromotriz que corresponde a esta excitación es 140 volts.

1.° Calcular la intensidad de la corriente y la reactancia del motor;

2.° Se disminuye la excitación hasta que el defasaje alcance a 30°; calcular cuál es entonces la intensidad de la corriente y cuál es la fuerza contraelectromotriz que corresponde a esta excitación.

XLII. Un motor trifásico asincrónico, de 14 polos, tiene su estator devanado en triángulo y alimentado por una corriente de 200 volts entre fases, de frecuencia 50. Su rotor gira con una velocidad de 250 vueltas por minuto y la resistencia de una de sus tres fases es 0,52 ohm. La potencia útil en la polea es 300 caballos y para esta potencia el rendimiento es 0,52.

Se quiere calcular: 1.°, el resbalamiento y el par motor del rotor; 2.°, las corrientes en una fase del rotor y del estator; 3.°, las pérdidas de potencia en el estator.

ALFABETO GRIEGO

Letra	Nombre	Letra	Nombre
Α α	alfa.	Ν ν	ni.
Β β ϐ	beta.	Ξ ξ	xi.
Γ γ	gamma.	Ο ο	ómicron.
Δ δ	delta.	Π π	pi.
Ε ε	épsilon.	Ρ ρ	rho.
Ζ ζ	tseta.	Σ σ ς	sigma.
Η η	eta.	Τ τ	tau.
Θ θ	zeta.	Υ υ	ípsilon.
Ι ι	iota.	Φ φ	fi.
Κ κ	kappa.	Χ χ	ji.
Λ λ	lambda.	Ψ ψ	psi.
Μ μ	mi.	Ω ω	omega.

ÍNDICE

CAPÍTULO PRIMERO

Energía —Sus formas.—Su medida.—Sus propiedades

CAPÍTULO II

Electricidad estática

CAPÍTULO III

Constitución de la materia

CAPÍTULO IV

Electrodinámica

CAPÍTULO V

Agrupamiento de los conductores

CAPÍTULO VI

Generalidades sobre los generadores y los receptores eléctricos

CAPÍTULO VII

Pilas y acumuladores

CAPÍTULO VIII

Acciones químicas de las corrientes

CAPÍTULO IX

Magnetismo y electromagnetismo

CAPÍTULO XII

Generadores mecánicos de electricidad; máquinas dinamo-eléctricas

CAPÍTULO XIII

Electromotores

CAPÍTULO XIV

Alumbrado eléctrico

CAPÍTULO XV

Introducción al estudio de las corrientes alternas

CAPÍTULO XVI

Propiedades de las corrientes alternas

CAPÍTULO XVII

Alternadores

CAPÍTULO XVIII

Cálculos relativos a las corrientes alternas

Págs.

CAPÍTULO XIX

Transformadores

CAPÍTULO XX

Campo giratorio

CAPÍTULO XXI

Alterno-motores

CAPÍTULO XXII

Sobretensiones (tensiones excesivas)

CAPÍTULO XXIII

Teoría elemental de la telefonía

CAPÍTULO XXIV

Calefacción eléctrica

CAPÍTULO XXV

Devanado de las máquinas

EJERCICIOS

GUSTAVO GILI, Editor

Calle de Enrique Granados, 45. — BARCELONA

Electricidad (Tomo II del **Tratado de Física**), por el doctor R. W. POHL. Un vol. de 380 págs., de 25 × 16 cms., con 393 grabados.

Problemas de Electricidad, por H. VIEWEGER. Un vol. de 524 págs., de 20 × 13 cms., con 250 grabados.

La Electricidad y sus aplicaciones, por el Dr. L. GRAETZ. 2.ª ed., corregida y ampliada. Un vol. de 650 págs., de 25 × 16 cms., con 706 grabados.

Nociones de Electricidad industrial, por J. A. KANDYBA. Un vol. de 252 págs., de 20 × 13 cms., con 104 grabados.

Compendio de Electricidad práctica, *para maquinistas, montadores y propietarios de instalaciones eléctricas,* por H. SCHOENTJES. 3.ª ed., aumentada. Un vol. de 292 págs., de 20 × 13 cms., con 171 grabados.

Curso de Electrotecnia. *Producción y aprovechamiento de la corriente eléctrica,* por E. KOSACK, ingeniero. Un volumen de 430 págs., de 23 × 15 cms., con 296 grabados.

Conducción y manejo de las máquinas y de las centrales eléctricas *de grande y de pequeña potencia,* por G. VEROI, ingeniero. Un volumen de 496 págs., de 23 × 15 cms., con 465 grabados a varias tintas y tres láminas.

Acoplamiento de alternadores. *Normas para la asociación en paralelo de las máquinas de corriente alternativa,* por A. SCHNITZLEIN, ingeniero. Un vol. de 100 págs., de 20 × 13 cms., con 43 grabados.

Manual práctico del montador electricista. *Guía para el montaje y dirección de toda clase de instalaciones eléctricas. Curso de electricidad industrial,* por J. LAFFARGUE. 6.ª edición, ampliada. Un volumen de 906 págs., de 18 × 13 cms., con 908 grabados y cuatro láminas en color.

Contadores eléctricos de corriente alterna, por J. DOMÉNECH CAMÓN. Un vol. de 206 págs., de 20 × 13 cms., con 121 grabados.

Tratado de Galvanotecnia, por el Dr. W. PFANHAUSER. Un volumen de 798 págs., de 25 × 16 cms., con 335 grabados.

Compendio de Radiotelefonía. *Fundamento, construcción y manejo de una radioestación de aficionado,* por L. F. KENDALL, profesor de la Radio School de Filadelfia, y R. P. KOEHLER, director de las Escuelas técnicas de la misma ciudad. Un volumen de 310 págs., de 20 × 13 cms., con 142 grabados.

Tratado popular de Física, por los Dres. KLEIBER y KARSTEN. 5.ª ed. Un volumen de 540 págs., de 20 × 13 cms., con 540 grabados y una lámina en color.

La Física y sus aplicaciones, por el Dr. L. GRAETZ. Un vol. de 614 págs., de 25 × 16 cms., con 371 grabados en negro y en color.

Tratado de Física, por O. MURANI, profesor del Real Instituto Técnico de Milán. Dos volúmenes de 23 1/2 × 15 cms.

TOMO I: **Mecánica. Acústica. Termología.** 694 páginas, con 592 grabados.

TOMO II: **Optica. Electricidad.** 904 págs., con 803 grabados.

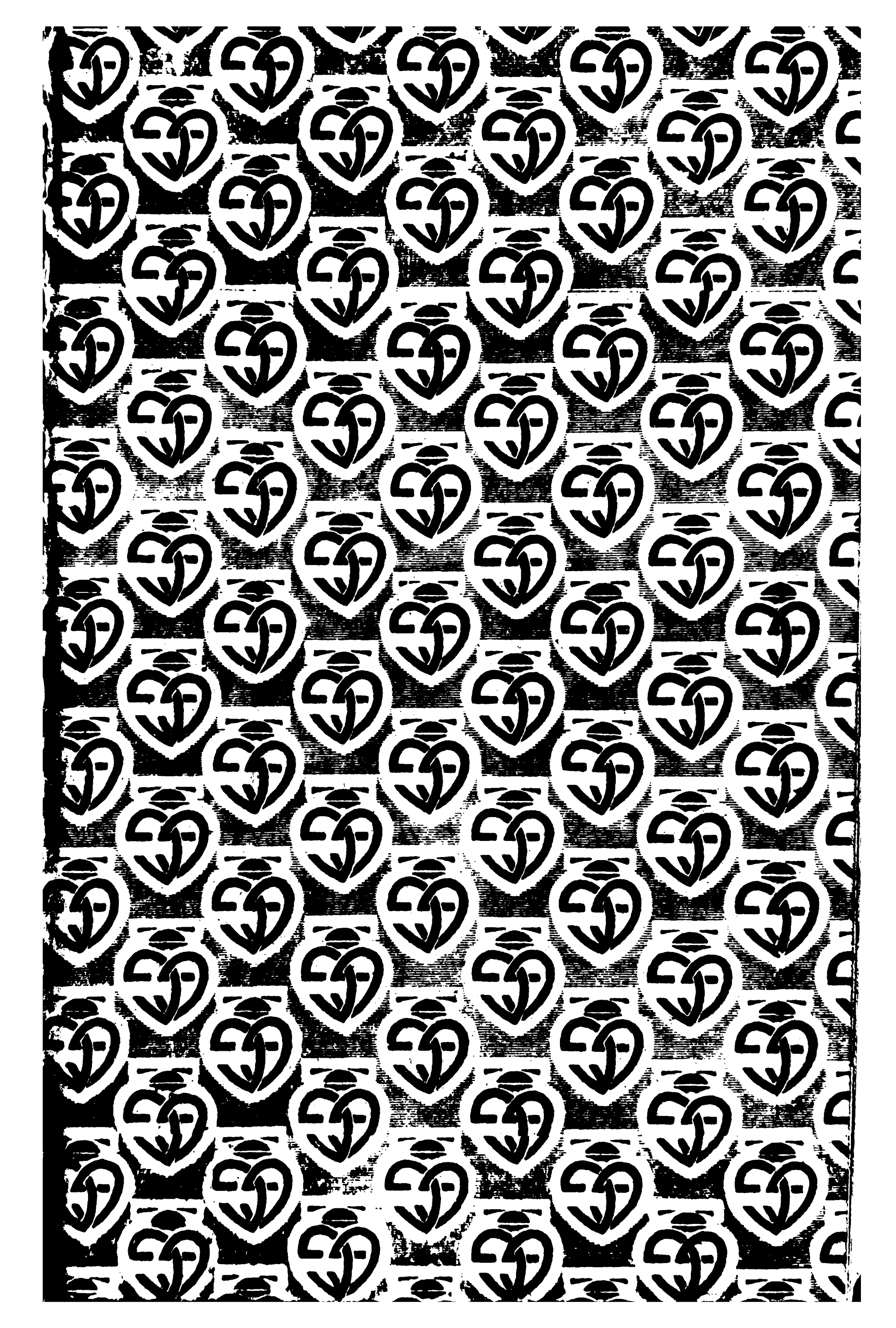
Física moderna. *Exposición sintética, al alcance de todos, de las últimas conquistas de la Física contemporánea,* por el Dr. C. CASTELFRANCHI. Un vol. de 980 págs., de 25 × 16 cms., con 210 grabados.

Astronomía popular, por NEWCOMB y ENGELMANN, ampliada por H. LUDENDORFF. Un volumen de 824 págs., de 25 × 16 cms., con 240 grabados.

Ciencia recreativa. *Enigmas y problemas, observaciones y experimentos, trabajos de habilidad y paciencia,* por el Dr. J. ESTALELLA, catedrático de Física. 2.ª edición. Un vol. de 518 págs., de 23 × 15 cms., con 882 grabados.

Recetario de Droguería, por G. A. BUCHHEISTER y G. OTTERSBACH. Un vol. de 816 págs., de 23 1/2 × 15 cms.

El catálogo general de la casa Gustavo Gili se remite gratis a quien lo solicite.

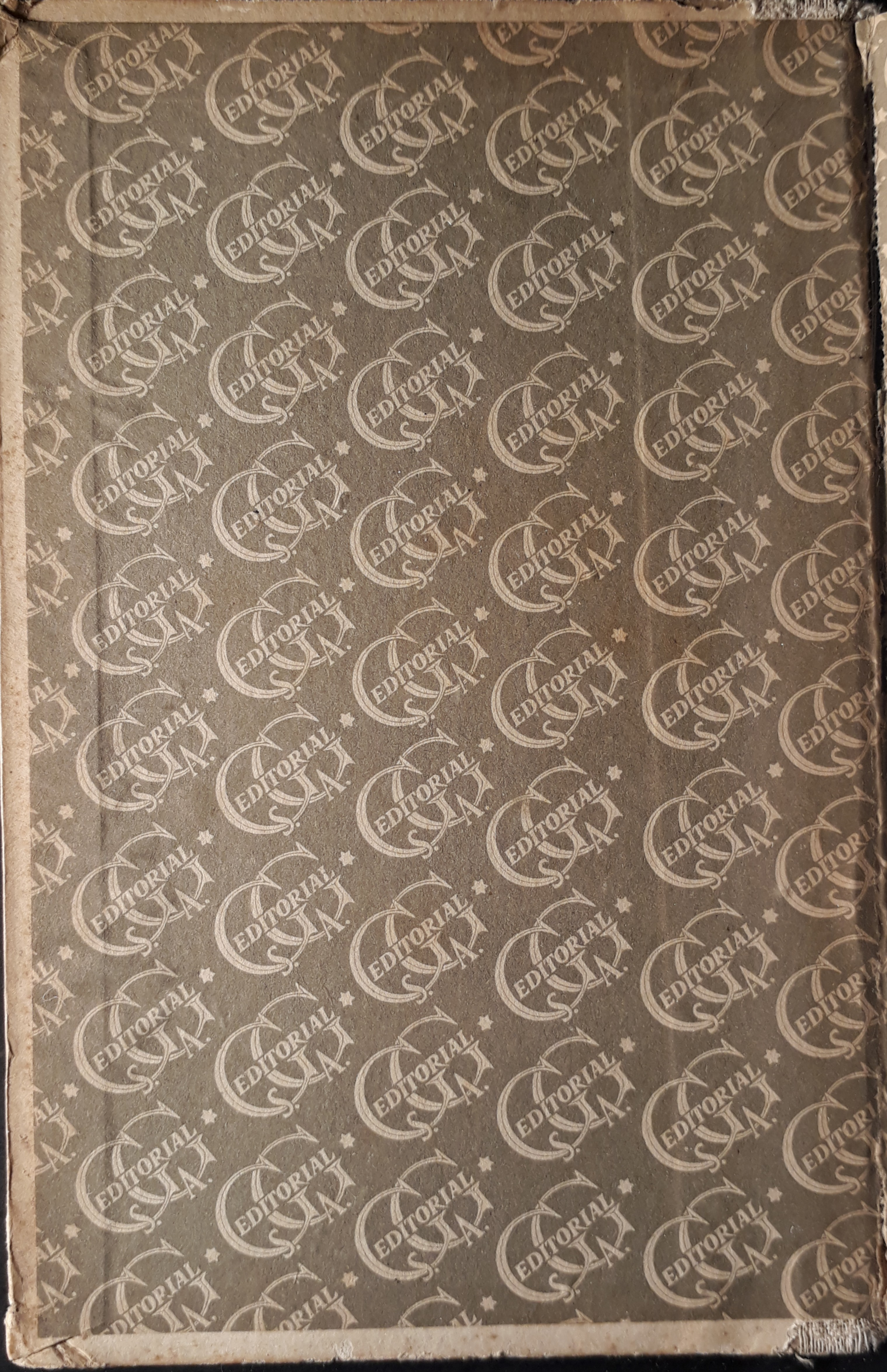


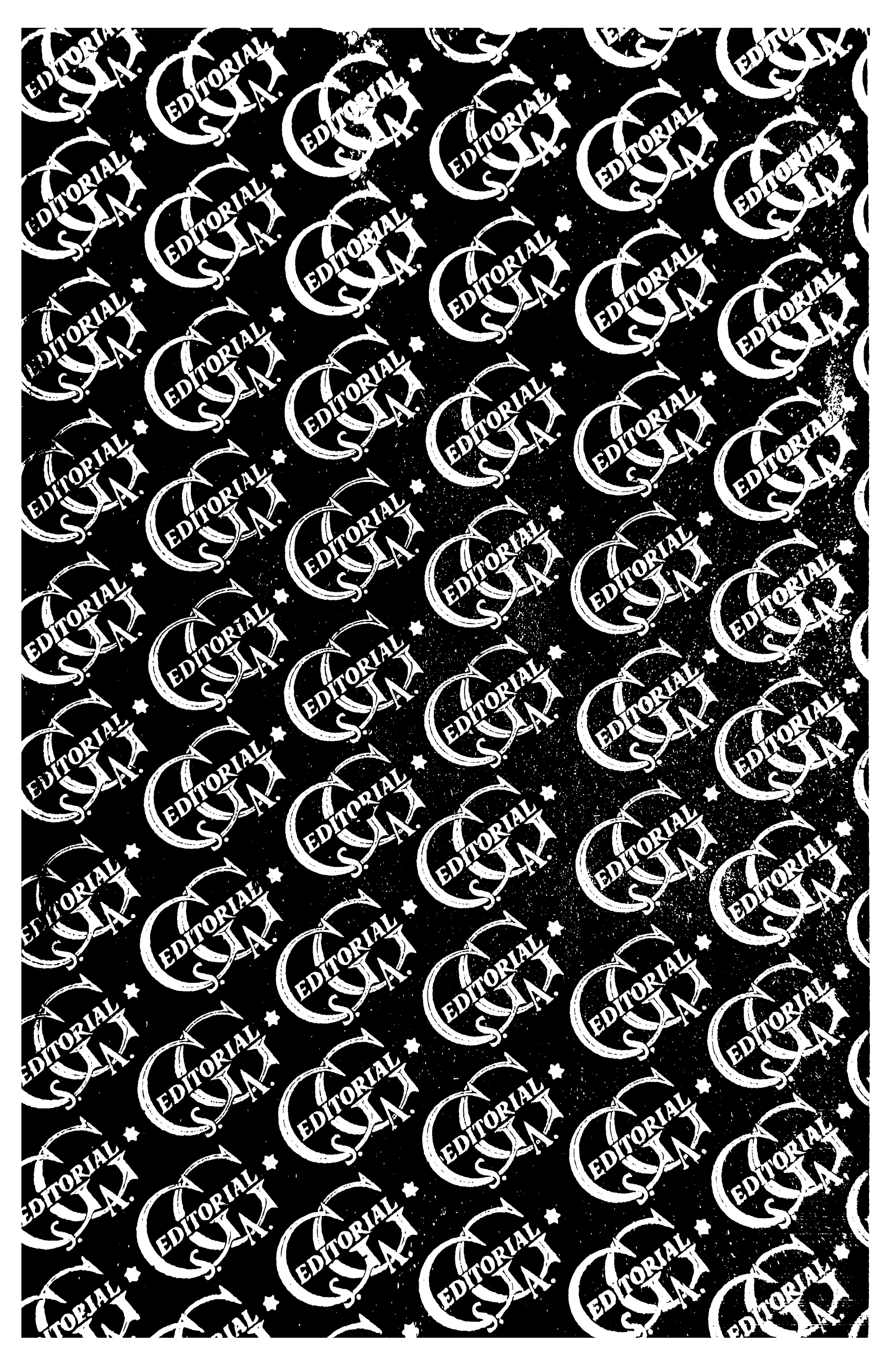
P. ROBERJOT

ELECTRICIDAD INDUSTRIAL



II. Medidas


EDITORIAL


EDITORIAL
S.A.

ELEMENTOS DE ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

II

MEDIDAS ELÉCTRICAS INDUSTRIALES

ELEMENTOS
DE
ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

POR

P. ROBERJOT

TOMO I
GENERALIDADES

TOMO II
MEDIDAS ELÉCTRICAS INDUSTRIALES

TOMO III
MÁQUINAS ELÉCTRICAS

TOMO IV
INSTALACIONES INTERIORES
TIMBRES : TELÉFONOS : ALUMBRADO
MOTORES

TOMO V
CENTRALES Y REDES

BARCELONA
EDITORIAL GUSTAVO GILI, S. A.
Calle de Enrique Granados, 45

ELEMENTOS
DE
ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

POR

P. ROBERJOT

PROFESOR DE LA ESCUELA INDUSTRIAL DE REIMS

VERSIÓN POR

JOSÉ M.ª MANTERO

LICENCIADO EN CIENCIAS

TOMO II
MEDIDAS ELÉCTRICAS INDUSTRIALES

3.ª EDICIÓN, AMPLIADA CON ARREGLO A LA 3.ª FRANCESA



BARCELONA
EDITORIAL GUSTAVO GILI, S. A.
Calle de Enrique Granados, 45
MCMXLIV

S. A. D. A. G. — Rosellón, 298. — BARCELONA

CAPÍTULO PRIMERO

Patrones y aparatos de medida

Medir una cantidad es compararla con otra de la misma especie, llamada unidad. El resultado de esta comparación es un número que expresa cuántas veces la cantidad considerada contiene a la unidad; este número es el valor de la cantidad medida.

Trabajos de gran precisión y del dominio puramente científico han permitido realizar los patrones de las distintas cantidades eléctricas, según sus mismas definiciones. Los patrones son cantidades de valor conocido; generalmente son múltiplos o submúltiplos simples de la unidad. Sin embargo, hay casos en que es imposible obtener valores simples, y entonces el patrón es una cantidad cuyo valor es un número más o menos complicado.

Cuando se dispone de patrones, se puede comparar una cantidad con uno de ellos convenientemente elegido, es decir, se puede medir dicha cantidad. Para ello será preciso: 1.º, conocer un método mediante el cual pueda efectuarse esta comparación; 2.º, disponer de los instrumentos necesarios para realizarla prácticamente.

Patrones empleados en las medidas de las cantidades eléctricas

Los patrones que se necesitan para medir todas

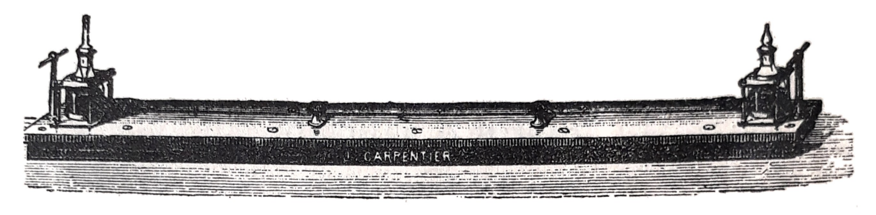


Fig. 1. — Prototipo del ohm internacional.

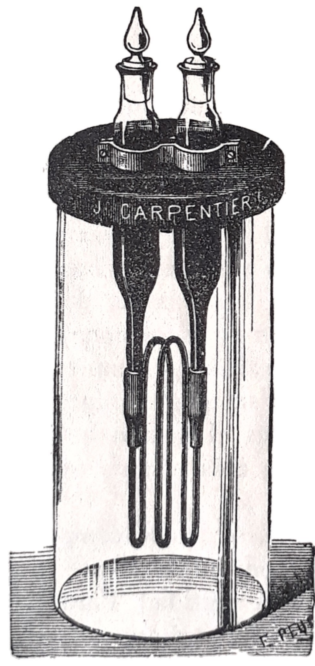


Fig. 2. — Patrón secundario del ohm internacional.

las cantidades eléctricas son: patrones de resistencia, de fuerza electromotriz y de capacidad.

I. Patrones de resistencia. — Por experimentos directos y medidas absolutas, se sabe que la unidad práctica de resistencia, el *ohm*, está representada por la resistencia que opone al paso de una corriente invariable una columna de mercurio a la temperatura del hielo fundente que tenga una masa de 14,452 gr., una sección constante, y una longitud de 106,3 cm.; este es el ohm internacional, que prácticamente es la verdadera unidad de resistencia universalmente adoptada (figs. 1 y 2).

Por exigencias de las necesidades de la práctica, se han construído patrones metálicos del ohm, de sus múltiplos y submúltiplos (figs. 3 y 4); estos patrones, determinados por comparación con el ohm internacional, están construídos de una aleación tal, que sus resistencias varían muy poco con la temperatura y están generalmente agrupados en cajas llamadas «cajas de resistencia» que se encuentran en la industria. El hilo que constituye cada resistencia está arrollado sobre un carrete de madera parafinada, después de haberlo doblado, para evitar los efectos de autoinducción (selfinducción) que se producen al efectuar las medidas (fig. 5).

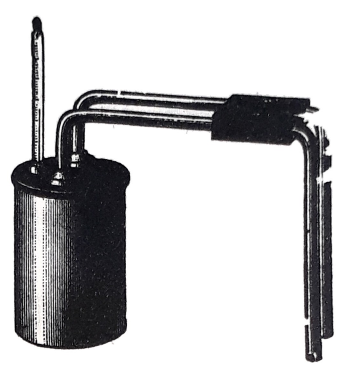


Fig. 3. — Ohm patrón de hilo metálico.

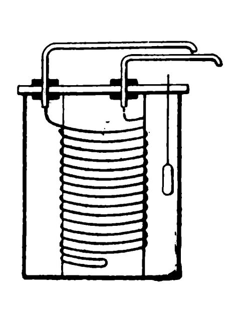


Fig. 4.

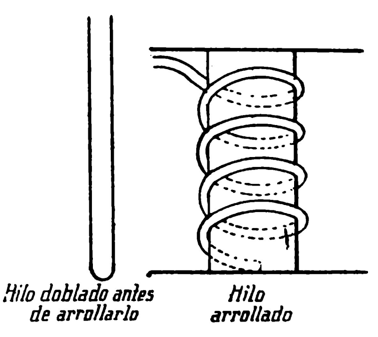


Fig. 5.

El doble devanado tiene el inconveniente de dar a los carretes una capacidad cuyos efectos son tan perjudiciales como los de la autoinducción, por lo cual se

prefiere con frecuencia hacer el devanado sin autoinducción sobre mica muy delgada de modo que resulte despreciable la sección del flujo.

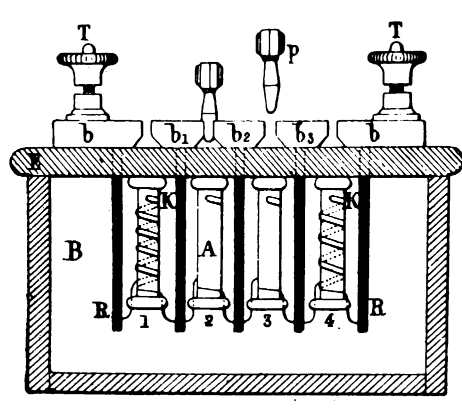


Fig. 6.

A veces, después de haber arrollado el hilo se sumerge completamente en parafina.

Cajas de resistencias. — En general, una caja de resistencia está formada del modo siguiente: sobre la tapadera de ebonita de la caja hay colocada una serie de topes de cobre separados entre sí; entre dos topes o contactos sucesivos están soldados los extremos del hilo que constituye una resistencia; todas las resistencias así formadas están

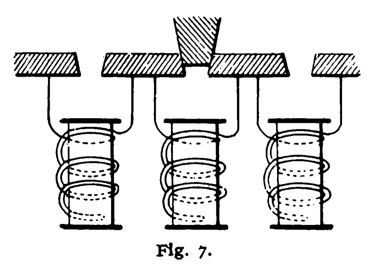


Fig. 7.

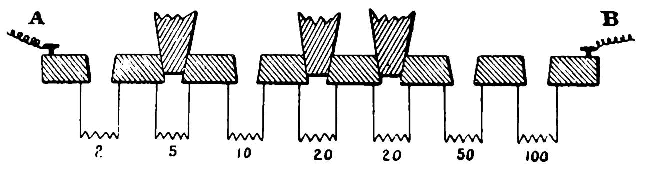


Fig. 8. — Resistencia comprendida entre *A* y *B*: 2 + 10 + 50 + 100 = 162 ohms. Las resistencias 5, 20, 20 están en cortocircuito mediante clavijas.

en el interior de la caja. Una clavija de cobre puede

colocarse en el espacio comprendido entre dos contactos sucesivos de modo que se establezca una conexión perfecta entre los mismos; esta clavija suprime

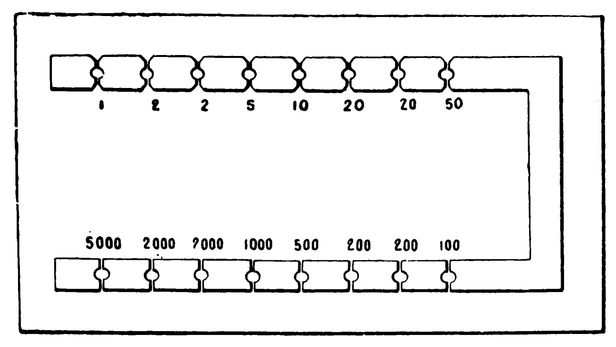


Fig. 9.

la resistencia comprendida entre los dos contactos, poniéndola en cortocircuito (figs. 6, 7 y 8).

De esta manera se construyen cajas que permiten hacer variar la resistencia total de ohm en ohm.

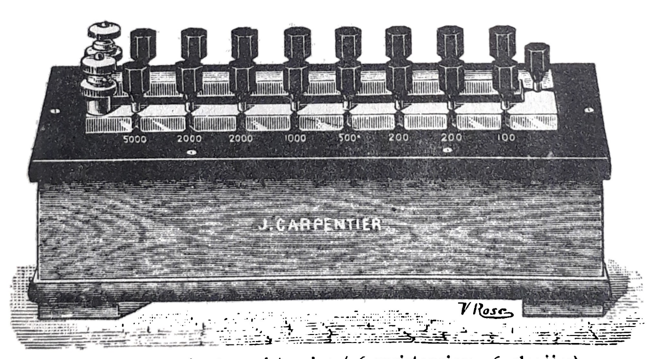


Fig. 10. — Caja de resistencias (16 resistencias; 16 clavijas).

En las figuras 9 y 10 se ve una caja de resistencias cuya disposición, análoga a la de una caja de pesos, permite obtener, ohm por ohm, una resistencia hasta

de 11 110 ohms; las resistencias se suceden en el orden siguiente:

1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100, 200, 200, 500, 1000, 2000, 2000, 5000

es decir, que hay 16 resistencias y 16 clavijas.

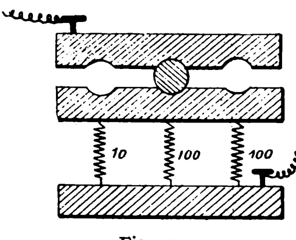


Fig. 11.

También se emplea la disposición indicada en las figuras 11 y 12, mediante la cual se introduce una resistencia colocando la clavija correspondiente. La ventaja de este sistema consiste únicamente en que sólo se utiliza una clavija, lo cual reduce al mínimo las resistencias de contacto; en cambio, como las resistencias no se van sumando, su número ha de ser mucho más considerable que en la disposición precedente, y por lo tanto, el precio de una de estas cajas es bastante más elevado. Esta disposición se reserva para las resistencias de precisión.

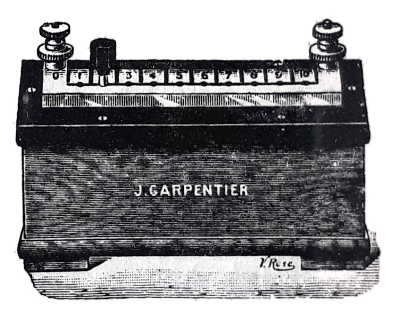


Fig. 12. — Caja de resistencias (una sola clavija).

De esta forma existen cajas con las cuales se puede obtener de ohm en ohm una resistencia hasta de 9999 ohms: esta es la disposición en década. La caja contiene:

9 carretes de 1 ohm;
» » » 10 »
» » » 100 »
» » » 1000 »

teniendo así 36 carretes y 4 clavijas (figs. 13 y 14).

También hay otra disposición en décadas representada por la figura 15. Sus contactos están dispuestos según una circunferencia, y mediante una manecilla

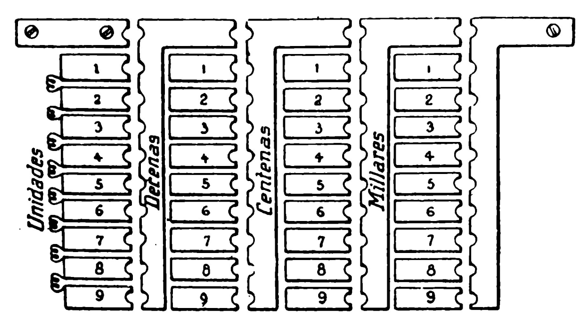


Fig. 13.

puede colocarse un botón metálico sobre uno cualquiera de los contactos. Una caja comprende generalmente

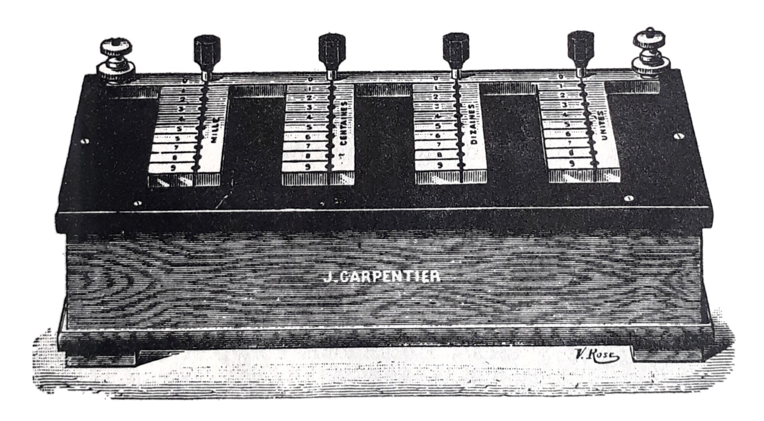


Fig. 14. — Caja de resistencias de 9 999 ohms.

cuatro grupos formados respectivamente por resistencias de 1 ohm, 10 ohms, 100 ohms y 1 000 ohms.

Esta disposición tiene la ventaja de ser de manejo

fácil y cómodo, pero las resistencias de contacto entre los topes y la manecilla pueden ser importantes.

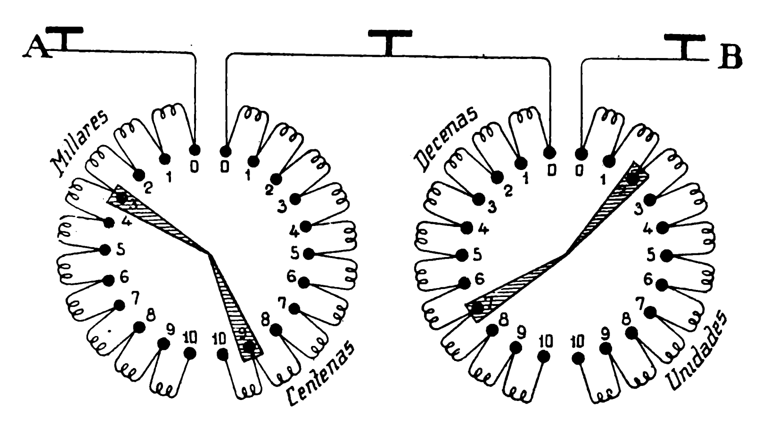


Fig. 15. — Disposición en décadas.

OBSERVACIÓN. — En las cajas destinadas a las medidas corrientes en la industria, las resistencias están contrastadas a $^1/_{500}$ del valor marcado.

En las cajas de precisión, las resistencias están contrastadas con $^1/_{1000}$ de aproximación.

Precauciones que hay que tomar en el empleo de las cajas de resistencias. — Para que el contacto entre las clavijas y los topes no introduzca en el circuito resistencias que falsearían los resultados, es preciso tomar algunas precauciones. Las clavijas deben conservarse muy limpias y secas, frotándolas con piel de gamuza cada vez que se hayan utilizado; los espacios en que entran las clavijas han de limpiarse con una clavija de madera recubierta de piel de gamuza. La placa de ebonita donde van los topes debe mantenerse muy limpia, y el polvillo que pudiera depositarse entre los topes debe quitarse con un pincel o plumero. Cuando se coloca una clavija, es conveniente introducirla entre los dos topes

imprimiéndole una ligera rotación al mismo tiempo que se ejerce la presión.

Cuando las cajas están provistas de interruptor, sucede con mucha frecuencia que los dos contactos de este interruptor se oxidan, originándose un mal contacto al cerrar el circuito. Este inconveniente se salva pasando un papel de esmeril muy fino sobre el contacto.

Por estar las resistencias rodeadas por completo de parafina, que constituye un aislador térmico, no deben ser recorridas más que por débiles corrientes y durante muy poco tiempo; es preciso, no sólo que no se queme la resistencia, sino que no se altere su valor por un calentamiento excesivo. Las intensidades que pueden admitirse mientras se efectúa una lectura rápida pueden ser del orden de magnitud indicado en el cuadro siguiente:

Resistencias	Intensidad máxima
1 a 10 ohms	0,3 a 0,1 ampere
10 » 100 »	0,1 » 0,03 »
100 » 1000 »	0,03 » 0,01 »
1000 » 10000 »	0,01 » 0,003 »

Al hacer el montaje para efectuar una medida es prudente calcular aproximadamente la intensidad de la corriente que recorrerá las resistencias conocidas, cuidando de quedar todo lo posible por debajo de los valores máximos citados.

Para evitar que accidentalmente puedan ser recorridas por una corriente demasiado intensa o durante un tiempo demasiado largo, será conveniente al hacer un montaje levantar la clavija correspondiente a una resistencia elevada: 10000 ohms, por ejemplo.

Resistencias para corrientes intensas. — Cuando las resistencias contrastadas han de ser recorridas por corrientes bastante intensas, se construyen con varios hilos

metálicos dispuestos en paralelo (figs. 16 y 17); a veces se forman también de tiras de una aleación (cuyo tipo es el maillechort en que la resistencia varía muy poco en la temperatura) sumergidas en un baño de aceite, y

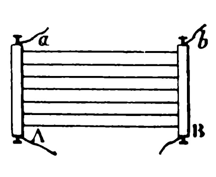


Fig. 16.

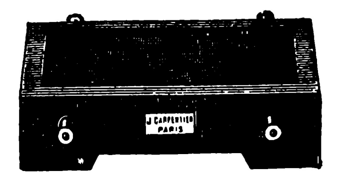


Fig. 17.

cuyas resistencias son en general muy poco elevadas: 1 ohm, $^1/_{10}$, $^1/_{100}$, $^1/_{1000}$ de ohm (fig. 18).

Las intensidades de corriente que se pueden admitir en estas resistencias, construídas por Carpentier, son:

para 1	ohm	....	10	amperes
» 0,1	»	....	10 a 15	»
» 0,01	»	....	100 » 200	»

Ordinariamente llevan estas resistencias dos grandes bornes *A* y *B* a los cuales se fijan los cables que conducen la corriente, y otros dos bornes pequeños *a* y *b* destinados a tomar derivaciones entre los extremos de la resistencia. Estos bornes sujetan generalmente hilos finos que van a parar a instrumentos en que se mide la intensidad por el método de la diferencia de potencial entre los extremos.



Fig. 18.

II. Patrones de fuerza electromotriz. — Los patrones de fuerza electromotriz están constituídos por elementos de pila conforme a condiciones definidas con

precisión. Estos elementos han de ser tales, que todos los construídos rigurosamente en las condiciones indicadas tengan la misma fuerza electromotriz y la conserven invariable, a una misma temperatura, si se utilizan con las precauciones que indicaremos.

Las principales pilas patrones son el elemento Latimer-Clark, el elemento Weston y el elemento Daniell.

Elemento Latimer-Clark. — El elemento Latimer-Clark, sobre cuya construcción no nos detendremos, está formado por las siguientes sustancias: mercurio, sulfato mercurioso, sulfato de zinc, y zinc (fig. 19).

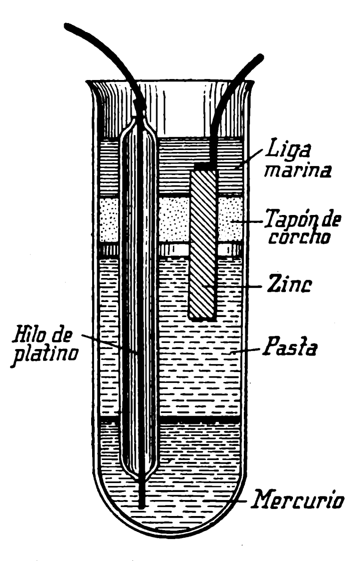


Fig. 19. — Elemento Latimer-Clark.

La fuerza electromotriz es de 1,434 volts a 15°, y varía de un modo sensible con la temperatura: un poco más de $^1/_{1000}$ de volt por grado; a t^o su f. e. m. es:

$$1434\,[1-0{,}00077\,(t-15)] \quad \text{o bien,} \quad 1434-0{,}0011\,(t-15)\ \text{(1)}$$

(1) La unidad de fuerza electromotriz o volt es la fuerza electromotriz de una corriente de 1 ampere a lo largo de un conductor cuya resistencia es de 1 ohm. Para las necesidades de la práctica, el volt está representado por 0,6974 ó $\frac{1000}{1434}$ de la fuerza electromotriz de un elemento Latimer-Clark (*Journal Officiel* del 2 de mayo de 1896). Su temperatura no está indicada en el *Officiel* y debe ser de 13°,8 (en vez de 15° que se había adoptado hasta aquí) para que la fuerza electromotriz sea rigurosamente de 1,434 volts, según las medidas efectuadas últimamente.

Elemento Weston. — Este elemento está formado de mercurio, sulfato mercurioso, sulfato de cadmio y amalgama de cadmio (fig. 20).

Su fuerza electromotriz es a 20°, de 1,0183 volts; y a t^o, es:

$$1{,}0183 - 4{,}06 \times 10^{-5}\,(t - 20) - 9{,}5 \times 10^{-7}\,(t - 20)^2;$$

se ve en esta fórmula que el elemento Weston tiene sobre el Latimer-Clark la ventaja de que su fuerza electromotriz varía mucho menos (unas 30 veces menos) con la temperatura; actualmente se utiliza mucho más que el elemento Latimer.

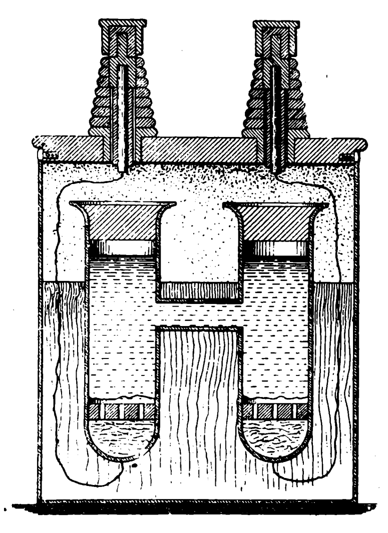


Fig. 20. — Elemento Weston.

Elemento Daniell. — Los elementos Latimer y Weston exigen para su empleo muchas precauciones y métodos de medida especiales que han hecho que éstos sean los patrones empleados en los laboratorios científicos. El elemento Daniell, en cambio, es un patrón de laboratorios industriales, y está formado por los cuerpos siguientes: zinc, sulfato de zinc, sulfato de cobre y cobre. Cuando la concentración de las disoluciones tiene un valor determinado (que indicaremos más adelante, en la parte de este capítulo dedicado a los ejercicios) y el vaso poroso ha sido sometido a un tratamiento especial que también daremos a conocer, su fuerza electromotriz tiene un valor invariable igual

a 1,10 volts y muy sensiblemente independiente de la temperatura.

Precauciones que deben tomarse en el empleo de las pilas patrones. — Cuando estos elementos han producido una corriente, por débil que ésta sea, sus fuerzas electromotrices pueden, por este hecho, alterarse o modificarse, de modo que no se pueda contar en adelante con sus valores como tipos. Los métodos de medida que exigen el empleo de pilas patrones deben cumplir con la condición de que estos patrones no produzcan corriente, es decir, no estén cerrados más que sobre una resistencia de 100000 ohms por lo menos y durante un tiempo muy corto. Cuando se utiliza un elemento Latimer-Clark, habrá que leer, en el momento de efectuar la medida, su temperatura sobre el termómetro que siempre debe acompañarle.

Si hay que usar con mucha frecuencia los patrones es conveniente conservar con gran cuidado un elemento, que servirá sólo para comprobar de vez en cuando los valores de los que se utilizan corrientemente.

El elemento Daniell puede dar, sin que su fuerza electromotriz se altere, una corriente del orden del miliampere; puede cerrarse sobre una resistencia de 5000 ohms por lo menos.

III. Patrones de capacidad. —Los patrones de capacidad son condensadores de capacidad conocida.

Un condensador está formado por dos conductores o *armaduras* separados por un aislador o *dieléctrico* (fig. 21). La experiencia nos enseña que si entre las armaduras se aplica una diferencia de potencial igual a u volts, estas dos armaduras toman cantidades de electricidad iguales y de

D

A A

Fig. 21.

signos contrarios, $+q$ y $-q$ coulombs; esta cantidad q recibe el nombre de *carga* tomada por el condensador. Para un mismo condensador, esta carga es proporcional a la diferencia de potencial, y es de la forma:

(1) $$q = c \times u,$$

siendo c una constante que depende de la superficie de las armaduras, del espesor y de la naturaleza del dieléctrico y que recibe el nombre de *capacidad del condensador*: la unidad de capacidad se llama *farad*. Si en la igualdad (1) se hace $q = 1$ y $u = 1$, se tiene $c = 1$. Por consiguiente, el farad es la capacidad de un condensador que, cargado con una diferencia de potencial de 1 volt, toma una carga de 1 coulomb.

La capacidad de un condensador es tanto mayor cuanto más grandes son las superficies de las armaduras y menor el espesor del aislador; también depende de la naturaleza de este aislador.

Los condensadores que se usan en la práctica tienen una capacidad bastante menor que el farad, de modo que ha habido necesidad de expresar el valor de una capacidad, no en farads, sino en *microfarads* o millonésimas de farad.

Generalmente los condensadores están formados por placas delgadas conductoras, separadas por hojas de papel parafinado o de mica. Todas las placas conductoras pares están unidas entre sí constituyendo una armadura, y todas las impares forman la otra armadura (fig. 22).

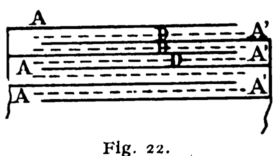


Fig. 22.

Los condensadores están constituídos por un sistema de hojas de mica plateadas por sus dos caras: tienen por valor de su capacidad: 1 microfarad; 0,5; 0,2; 0,1

microfarad. Están contenidas en cajas que tienen una

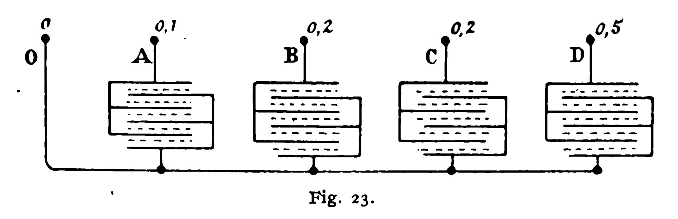


Fig. 23.

de las formas representadas por las figuras 23, 24, 25 y 26.



Fig. 24.

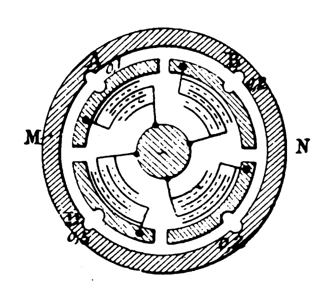


Fig. 25.

Cuando se coloca una clavija en *A*, se tiene una capacidad de 0,1 microfarad entre los bornes *M* y *N* (figura 25).

Colocando la clavija sucesivamente en *B*, *C*, *D*, se tiene entre los bornes las capacidades: 0,2; 0,2; 0,5 microfarad.

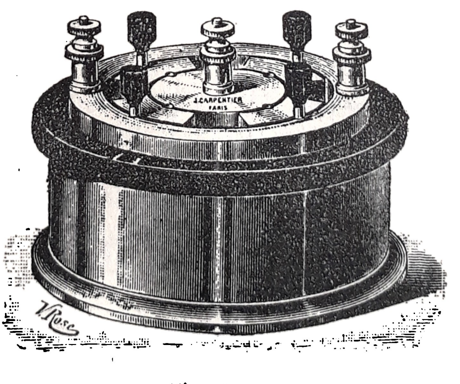


Fig. 26.

Si se ponen dos clavijas, una en *A* y otra en *B*, se tiene:

$$0,1 + 0,2 = 0,3 \text{ microfarad.}$$

Colocando cuatro clavijas, en *A*, *B*, *C* y *D*, se tiene:

$$0,1 + 0,2 + 0,2 + 0,5 = 1 \text{ microfarad.}$$

Aparatos empleados para las medidas

Los aparatos que se emplean para efectuar las diversas medidas de las principales magnitudes eléctricas son: galvanómetros, amperímetros y voltímetros; pilas y acumuladores; reostatos, y llaves o interruptores.

I. Galvanómetro Deprez y d'Arsonval.—El galvanómetro que se usa con más frecuencia es el galvanómetro Deprez y d'Arsonval, del cual hemos estudiado la teoría en el tomo I, GENERALIDADES. Se compone de un cuadro formado por un hilo de cobre aislado arrollado sobre sí mismo en un gran número de espiras rectangulares, cuyos dos extremos están soldados a dos ganchos, unidos a un hilo de torsión de plata que sirve al mismo tiempo para conducir la corriente al cuadro. Este cuadro puede oscilar alrededor del hilo de torsión en el campo de un potente imán permanente (figs. 27 y 28). Cuando

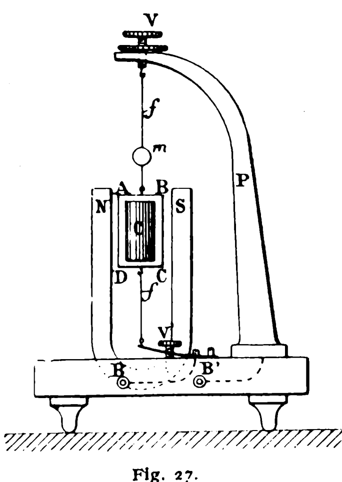


Fig. 27.

pasa una corriente por el cuadro, éste gira un cierto ángulo cuya tangente es proporcional a la intensidad de la corriente si el ángulo es muy pequeño, y en este caso el ángulo de rotación es muy aproximadamente proporcional a la intensidad.

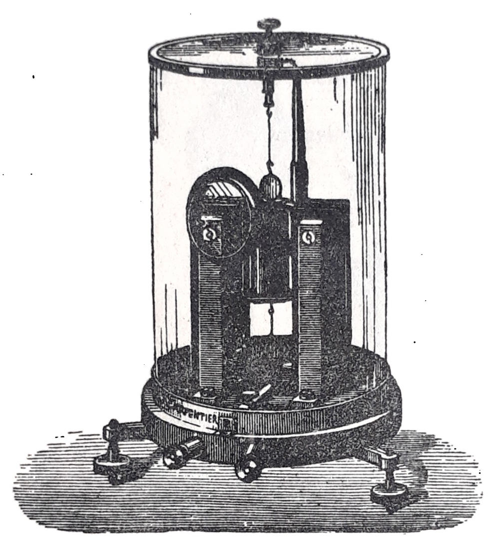


Fig. 28. — Galvanómetro Deprez y d'Arsonval.

Para hacer sensibles las oscilaciones del cuadro, se fija un pequeño espejo cóncavo sobre el hilo de torsión; se envía por medio de un espejo plano un rayo luminoso sobre el espejo cóncavo; este rayo luminoso se refleja e incide sobre una regla graduada transparente, donde produce una imagen del foco luminoso. Cuando el cuadro gira, la imagen se corre sobre la regla en una longitud tanto mayor para una misma torsión, cuanto mayor sea la distancia de la regla al galvanómetro. Ordinariamente en el soporte de la regla graduada está colocado el espejo plano que, siendo móvil alrededor de un eje horizontal y alrededor de un eje

vertical, puede orientarse en todas las direcciones. Delante del espejo plano y formando cuerpo con el soporte hay un disco con una abertura rectangular vertical, y un hilo que coincide con el eje vertical del rectángulo (figs. 29, 30 y 31). En estas condiciones, si

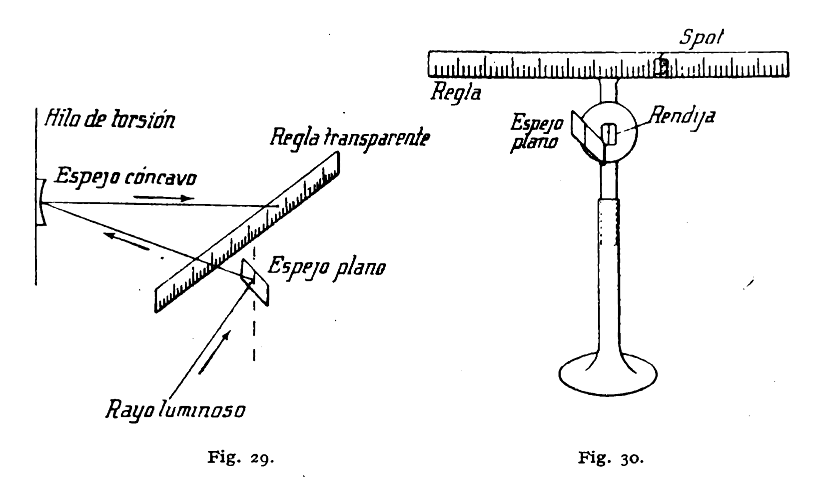


Fig. 29. Fig. 30.

delante del foco luminoso se coloca un cristal esmerilado, se forma una imagen sobre la regla; esta imagen consiste en un rectángulo luminoso en medio del cual se ve un trazo oscuro vertical. Dicha imagen ha recibido el nombre de «spot». El vástago o soporte de la regla está compuesto de dos partes, una de las cuales puede correrse sobre la otra, de modo que se puede variar la altura de la regla.

Cuando pasa una corriente por el galvanómetro, el «spot» se mueve en un sentido o en otro, según el sentido de la corriente.

Observación. — Se pueden obtener los «spots» de un modo más sencillo, enviando directamente sobre el espejo cóncavo, sin pasar por un espejo plano, los rayos luminosos que provienen de una lámpara con un fila-

mento rectilíneo. En este caso se forma sobre la regla un trazo luminoso que es la imagen del filamento, es decir, el «spot». Pero hay que tener en cuenta que entonces un movimiento del foco luminoso produce un movimiento del «spot», mientras que con el espejo plano

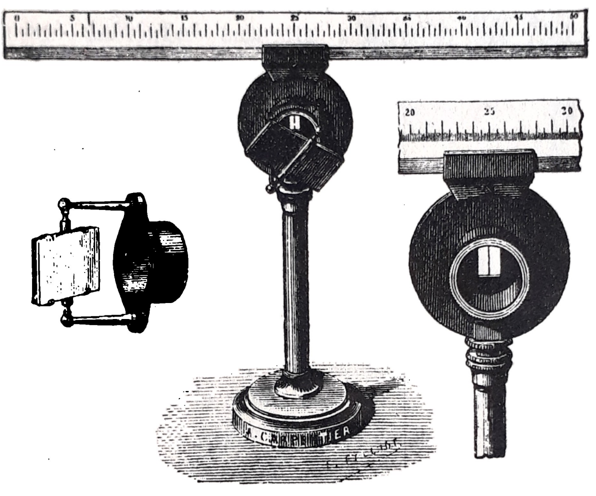


Fig. 31.

el objeto luminoso es la abertura rectangular iluminada, que permanece inmóvil para una posición invariable de la regla, a pesar de los movimientos del foco luminoso.

Amortiguamiento. — Cuando se interrumpe la corriente después de haberla hecho pasar por el cuadro del galvanómetro, éste no vuelve a su posición de equilibrio hasta después de un gran número de oscilaciones.

Estas oscilaciones quedan considerablemente reducidas, es decir, *amortiguadas* si el circuito del cuadro se cierra sobre una resistencia, y este amortiguamiento es tanto más rápido cuanto menor es esta resistencia.

En efecto, cuando el cuadro oscila en el campo creado por el imán del galvanómetro, el flujo que lo atraviesa varía a consecuencia de las oscilaciones del cuadro mismo, produciéndose entre sus extremos, es decir, entre los bornes del aparato, fuerzas electromotrices inducidas alternas. Si se unen los bornes mediante un conductor, las corrientes alternas inducidas circulan por el conductor y al mismo tiempo por el cuadro; estas corrientes inducidas, según la ley de Lenz, tienden a oponerse a la causa que las produce, es decir, a las oscilaciones; por consiguiente, el amortiguamiento será tanto más rápido cuanto más intensas sean estas corrientes, o, lo que es igual, cuanto menor sea la resistencia sobre la cual se cierra el cuadro. El amortiguamiento es instantáneo si el galvanómetro está cerrado en cortocircuito; por lo tanto, en toda medida que se efectúe con el galvanómetro es preciso que haya posibilidad de llevar instantáneamente el «spot» al cero de la escala por medio de una llave que ponga al aparato en cortocircuito.

Valor de la desviación. — La sensibilidad de este galvanómetro es tal, que cuando es atravesado por 1 microampere (una millonésima de ampere) el «spot» recorre sobre una regla situada a la distancia de un metro, varios milímetros.

Cuando al verificar una medida hay que utilizar el valor del movimiento de la imagen sobre la escala, es preciso proceder de modo que la desviación no sea demasiado pequeña, porque el error relativo debido a la lectura podría ser bastante grande; también hay que evitar que dicha desviación sea demasiado grande, porque el movimiento de la imagen no podría considerarse como proporcional a la corriente. El valor más conveniente es el de 15 a 20 centímetros, admitiéndose que el error relativo no pasa entonces del 0,5 %.

Galvanómetro balístico. — Un galvanómetro balístico es un galvanómetro con cuadro móvil, construído del mismo modo que el que acabamos de estudiar; pero

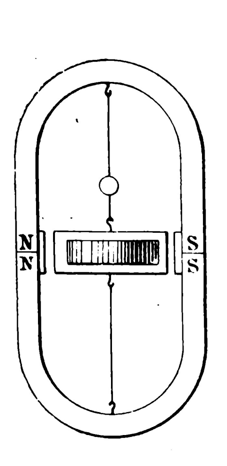


Fig. 32.

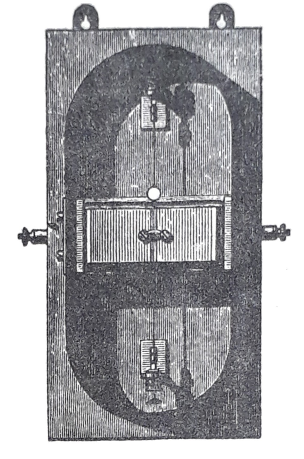


Fig. 33. — Galvanómetro balístico.

su parte móvil tiene un momento de inercia respecto al eje de oscilación mucho más grande. Este resultado se obtiene generalmente dando al cuadro una gran longitud en la dirección perpendicular al hilo de suspensión (figs. 32 y 33). El galvanómetro Deprez y d'Arsonval puede transformarse en balístico fijando por debajo del cuadro una varilla con dos pequeñas masas *m*, *m*, aumentando así su momento de inercia (figura 34).

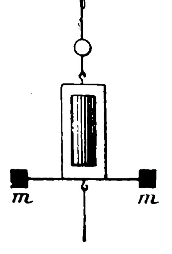


Fig. 34.

En estas condiciones, el cuadro emplea un tiempo más considerable en moverse bajo la influencia de la corriente que lo atraviesa. Por consiguiente, si se unen los dos bornes de un galvanómetro balístico a las dos armaduras de un con-

densador cargado con una cierta cantidad de electricidad q, este condensador se descarga instantáneamente en el galvanómetro, de tal manera, que toda la carga q lo atravesará antes que la parte móvil se ponga en movimiento. Es decir, que el cuadro recibirá de esta cantidad de electricidad una impulsión, y por consiguiente se desviará, y después de varias oscilaciones más o menos amplias volverá a su posición de equilibrio. El recorrido máximo de la imagen sobre la regla se llama *elongación;* se demuestra que cuando una cantidad q atraviesa un galvanómetro balístico, la elongación θ producida es proporcional a la cantidad q; es decir, que

$$q = K\,\theta,$$

siendo K un número constante que depende de la construcción del galvanómetro, y que se llama *constante del balístico.* Si se hace $\theta = 1$, se tiene $q = K$, luego la constante es igual al número que mide la cantidad de electricidad que produciría una elongación igual a una división de la regla.

OBSERVACIÓN. — Para que la elongación sea proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa al balístico, es preciso: 1.º, que esta cantidad haya recorrido completamente el cuadro antes que éste empiece a moverse; 2.º, que las condiciones de amortiguamiento sean las mismas, es decir, que el galvanómetro esté, en la serie de medidas efectuadas, cerrado sobre una misma resistencia.

II. Amperímetros y voltímetros. — Los amperímetros y voltímetros empleados ordinariamente son de cuadro móvil en el campo de un imán permanente. Están sujetos a errores notables, consistentes en poder indicar para una misma magnitud medida valores variables con el tiempo.

Estos errores provienen de las variaciones que puede experimentar la imanación del imán permanente; no se deben colocar estos aparatos cerca de campos potentes, como los creados por los inductores de las dinamos. Las indicaciones no son exactas en una medida hecha en estas condiciones, y los aparatos pueden sufrir una modificación a veces persistente. Es aconsejable, por lo tanto, en las medidas que requieran alguna precisión, desconfiar y tener en cuenta los errores inherentes a estos aparatos; es preciso, antes de efectuar la medida, compararlos con un amperímetro o voltímetro de precisión construído y conservado con gran cuidado y que servirá para determinar las correcciones que hay que hacer a las indicaciones dadas por el aparato utilizado. También se pueden contrastar los voltímetros y amperímetros valiéndose de un galvanómetro, según veremos más adelante.

III. Pilas y acumuladores. — Los generadores de corriente empleados en las medidas son las pilas y los acumuladores; cuando la intensidad de la corriente ha de ser muy pequeña, se emplea generalmente la pila de tipo Leclanché. Es preciso asegurarse de que la resistencia sobre la cual está cerrado el elemento es suficiente para que no se polarice; será preciso para ello evitar por medio de un reostato que produzca una corriente demasiado grande. Si la corriente ha de tener un valor dado, se emplea un acumulador; también es preciso tener cuidado con que esta corriente no sea mayor que el régimen del acumulador, y por otra parte que no sea demasiado elevada para el conductor que ha de recorrer. Se emplea también un acumulador con preferencia a una pila, cuando debiendo ser débil el gasto exigido, la diferencia de potencial haya de ser constante, pero entonces es preciso que el acumu-

lador no esté recién cargado; es necesario que haya trabajado un poco, porque en los primeros momentos de la descarga su fuerza electromotriz varía rápidamente. Por la misma razón, no debe emplearse cuando ha trabajado demasiado.

Es necesario además que en los circuitos que contienen estos generadores haya una llave que no los deje dar corriente más que durante el tiempo necesario para hacer las lecturas, evitando así que las resistencias del circuito se calienten inútilmente por el paso prolongado de la corriente.

IV. Reostatos. — Los reostatos están formados por un sistema de conductores que pueden agruparse de un modo que varíe la resistencia de su conjunto. Estos conductores pueden estar agrupados en serie (fig. 35), o en paralelo (fig. 36).

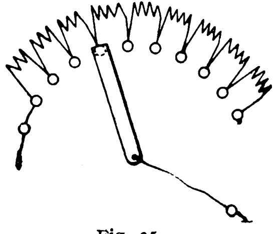


Fig. 35.

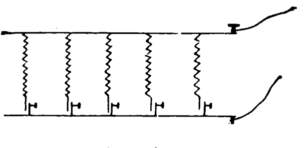


Fig. 36.

V. Llave e interruptor. — Cuando hay que cerrar un circuito durante un tiempo muy corto, se emplea una llave, representada por las figuras 37 y 38, sobre todo si la resistencia de contacto que así se introduce en el circuito no ejerce influencia alguna sobre el resultado de la medida.

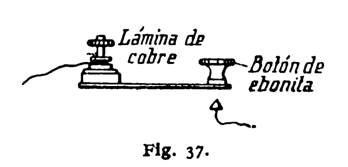


Fig. 37.

En cambio, si la corriente ha de pasar durante cierto tiempo, y si no conviene introducir en el circuito cerrado una resistencia, se emplea un interruptor de mercurio (fig. 39). Dos vasitos *A* y *B* incrustados en pequeños bloques de parafina, están llenos de mercurio. Los ex-

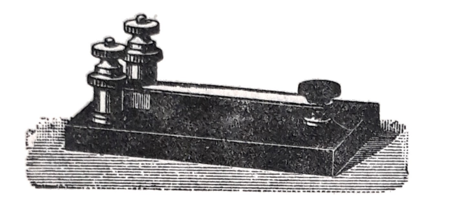


Fig. 38.

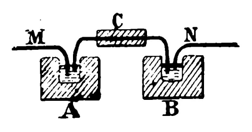


Fig. 39.

tremos *M*, *N* del circuito que se ha de cerrar están sumergidos en el mercurio; una horquilla de cobre *C* une los dos vasitos, permitiendo cerrar o abrir el circuito. Valiéndose de varios vasitos se pueden también obtener inversores de varias direcciones. En muchos montajes tendremos ocasión de encontrar estos interruptores e inversores.

EJERCICIOS DE LABORATORIO

1.° Regulación del galvanómetro Deprez y d'Arsonval

Los constructores envían los galvanómetros con el cuadro móvil descansando por su lado superior *AB* sobre el cilindro de hierro dulce *C*, de modo que puede moverse sin temor de romper el hilo de suspensión *ff* (fig. 27). Se coloca el galvanómetro sobre el soporte en que ha de quedar en adelante para efectuar las medidas y se procede a su regulación, que comprende las operaciones siguientes:

1.ª Nivelación, es decir, hacer que por medio de los tornillos de nivelación se coloque la base horizontal y los hilos de suspensión aproximadamente verticales;

2.ª Levantar el cuadro por medio del tornillo superior de llamada, hasta que los lados horizontales queden a igual distancia de las bases del cilindro, y después, por medio del tornillo inferior *V'*, dar a los hilos de suspensión una tensión conveniente;

3.ª Comprobar que el cuadro puede oscilar libremente sin rozamiento; se verifica fácilmente esta comprobación soplando sobre uno de los lados verticales. Si se nota que hay rozamiento, bastará mover convenientemente el cilindro *C* haciéndolo girar alrededor de la pieza que lo une a la consola o pescante;

4.ª Hacer girar el tambor superior de modo que el eje del espejo *m* se coloque en dirección perpendicular al campo magnético *NS* del imán.

2.º Modo de hacer la observación

Se coloca la escala graduada frente al espejo a 1 metro de distancia aproximadamente y a una altura tal que el borde inferior de la regla esté algo más alto que el espejo *m*. El foco luminoso se coloca detrás de la regla, o sea, al otro lado que el galvanómetro (figs. 29 y 45). Se orienta el espejo plano de modo que refleje los rayos luminosos del foco sobre el espejo cóncavo *m*, a través de la abertura. Entonces se observa la regla transparente, y si estaba colocada a una altura conveniente, los rayos enviados por *m* forman sobre ella una imagen más o menos clara de la abertura, bastando acercar o retirar la regla hasta que esta imagen se vea con toda claridad.

Si no se ve señal luminosa alguna sobre la regla, es porque no está a la altura conveniente; en este caso basta colocarse cerca de la regla y mirar por encima y por debajo, hasta que se vea el espejo *m* intensamente iluminado; así se reciben los rayos reflejados por *m* y se tiene la dirección en que se encuentra la imagen. Se sube o baja la regla hasta colocarla en esta dirección, y moviéndola ligeramente a derecha o a izquierda se tendrá la imagen de la abertura (fig. 27).

Cuando hay que emplear el galvanómetro como aparato de cero, es decir, para indicar que no pasa corriente por el circuito en que está intercalado, se procede de la manera indicada, y queda ya dispuesto para las observaciones.

Pero cuando se quiere medir la desviación del cuadro conociendo la longitud del camino recorrido por la imagen sobre la regla, hay que tomar la siguiente precaución: antes de pasar la corriente, el trazo vertical del «spot» debe caer sobre la división tomada como cero de la graduación, lo cual se consigue moviendo convenientemente la regla; además, la dirección de los rayos luminosos reflejados por el espejo cóncavo *m* debe ser aproximadamente perpendicular a la escala; esta condición puede realizarse orientando la regla.

3.° Estudio del amortiguamiento

Hacer el montaje indicado en la figura 40.

Se toma sobre la caja *R* una resistencia que dé, cuando el interruptor *I* esté cerrado, una gran desviación. Si estando abierto *I'* se abre *I*, la imagen sufre un gran número de oscilaciones alrededor de su posición de equilibrio, número que es imposible de contar.

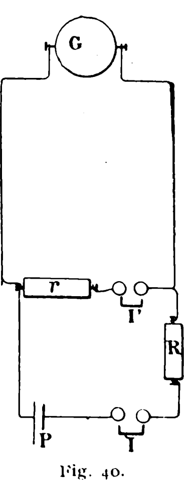


Fig. 40.

Se cierra otra vez *I*, tomando en la caja *r* una resistencia de 100 ohms, por ejemplo; se cierra *I'* y a continuación se abre *I*; después de un cierto número N_1 de oscilaciones, que se pueden contar, el cuadro vuelve a su posición de equilibrio. Se repiten las mismas operaciones tomando sucesivamente en *r* las resistencias 500, 200, 100, 50, 10, y se cuenta el número de oscilaciones para cada una de estas resistencias, N_2, N_3, N_4... Se comprueba que a medida que los valores de *r* disminuyen,

el número de oscilaciones disminuye. Cuando r es muy pequeño, la imagen vuelve a su posición de equilibrio sin oscilación. Pónganse en evidencia estas observaciones, resumiendo los resultados obtenidos en un cuadro como el siguiente:

RESISTENCIAS SOBRE LAS CUALES está cerrado el galvanómetro	NÚMERO de oscilaciones

4.° Magnitud de la desviación. — Sensibilidad

El mismo montaje precedente; se toma para r un cierto valor, por ejemplo, $r = 1\,000$, y se deja el interruptor I' cerrado; se toman para R valores elevados, por ejemplo, valores sucesivos iguales a $R = 10000$, $R = 5000$, $R = 2000$... y se lee para cada uno de estos valores la desviación correspondiente sobre la escala. Se comprueba que estas desviaciones son tanto menores cuanto mayor es R; para cada uno de estos valores se calculará la intensidad de la corriente que pasa por el galvanómetro, por medio de la fórmula:

$$i = \frac{E}{R + \dfrac{gr}{g+r}} \times \frac{r}{g+r} = \frac{Er}{R(g+r)+gr}.$$

Se conoce R y r; g, que es la resistencia del galvanómetro, está dada por el constructor; su valor es generalmente de unos 200 ohms; E es la fuerza electromotriz de la pila empleada. Se podrá deducir de aquí, aproximadamente, la *sensibilidad* del aparato, es decir, la desviación correspondiente a 1 microampere. Para desviaciones pequeñas se comprueba que estas desviaciones son proporcionales a las corrientes que pasan por el galvanómetro.

Los resultados obtenidos se ven con toda claridad por medio de la tabla siguiente:

$E =$ $g =$

r	R	MAGNITUD de la DESVIACIÓN: α	CORRIENTE en el GALVANÓMETRO $i = \frac{Er}{R(g+r)+gr}$	SENSIBILIDAD en milímetros por microampere	CONSTANTE: $\frac{i}{\alpha}$

Los resultados obtenidos de esta manera no tienen nada de absolutamente rigurosos; su objeto principal es dar una idea sobre el *orden de magnitud* de las corrientes que pasan por el galvanómetro.

5.° Influencia del valor del shunt r sobre la magnitud de la desviación

El mismo montaje de la figura 40. Se toma para R un valor constante, por ejemplo $R = 5000$ ohms, y se hacen variar los valores de r; se comprueba que las desviaciones son tanto menores cuanto menor es r. Tómense sucesivamente, por ejemplo, los valores $r = 1\,000$, $r = 500$, $r = 200$, $r = 100$, $r = 10$; y los resultados se resumen en la tabla siguiente:

	VALOR DEL SHUNT : r	DESVIACIONES
$R =$		

6.° Construcción de un elemento Daniell patrón

Este elemento está formado por un vaso de vidrio que contiene una solución de sulfato de zinc en la cual se halla sumergida una lámina de zinc puro, y un vaso poroso; en

el vaso poroso hay una solución de sulfato de cobre con una lámina de cobre puro.

La fuerza electromotriz de este elemento permanece constante mientras la concentración de las dos soluciones no varía. Se logra esto empleando soluciones equimoleculares de ambos sulfatos y separándolas por una membrana semipermeable de ferrocianuro de cobre.

Para ello se parafina la parte superior del vaso poroso, y se inmerge en agua para eliminar las burbujas de aire. Se llena entonces de una solución poco concentrada de ferrocianuro de potasio (4 por 1000 aproximadamente), y sacándolo del agua se coloca dentro de una solución de sulfato de cobre (16 por 1000 aproximadamente), teniendo cuidado de evitar que queden burbujas de aire debajo del vaso poroso y procurando que la solución pueda circular libremente, manteniendo el vaso poroso a una altura conveniente. El nivel de las soluciones debe subir por encima de la parte porosa del vaso, es decir, ha de estar hacia la parte parafinada del mismo. Según la mayor o menor porosidad de la pasta, la membrana se forma, en general, en un plazo de veinticuatro a setenta y dos horas, y se la ve aparecer al nivel de la parte parafinada, bajo el aspecto de una tenue línea oscura. Una desnivelación muy marcada entre las soluciones de dentro y de fuera del vaso poroso indica el momento en que la membrana se ha hecho realmente semipermeable. La tabla siguiente da las concentraciones relativas de las dos soluciones, para que ambas sean equivalentes:

SULFATO DE COBRE por 100 gramos de solución		SULFATO DE ZINC por 100 gramos de solución	
hidratado : $5H^2O$	anhidro	hidratado : $7H^2O$	anhidro
28 %	17,89 %	32 %	17,95 %
21,56	13,78	24,82	13,93
16,69	10,66	19,21	10,78
11,52	7,36	13,26	7,44
5,93	3,79	6,85	3,84

CAPÍTULO II

Medida de resistencias con el puente de Wheatstone

Teoría. — Consideremos cuatro resistencias r_1 r_2 r_3 r_4 dispuestas según un cuadrilátero *ABCD* (fig. 41); sobre una de las diagonales hay una pila y sobre la otra un galvanómetro *G*. Supongamos que estas resistencias tengan valores tales, que no pase corriente por el galvanómetro; esto es posible, porque en la rama *ABC* el potencial de sus puntos toma todos los valores posibles comprendidos entre los valores que hay en *A* y en *C*, luego existe un punto cuyo potencial es igual al de *D*. La corriente en *AB* es la misma que en *BC*; sea *i* su valor; por la misma razón la corriente en *AD* es la misma que en *DC* y supongamos su valor *i'*.

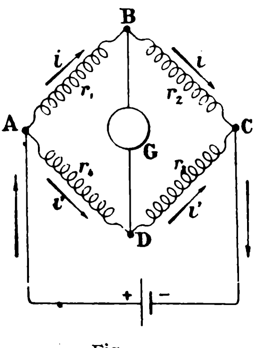


Fig. 41.

No pasando corriente por el galvanómetro, es evidente que *B* y *D* están al mismo potencial; por consiguiente, la diferencia de potencial entre *A* y *B*, es

decir, $r_1 i$, es la misma que entre A y D, que es $r_4 i'$; luego se tiene:

$$(1) \qquad r_1 i = r_4 i';$$

del mismo modo, la diferencia de potencial entre B y C, $r_2 i$, es igual a la diferencia de potencial entre D y C $r_3 i'$; por consiguiente, se tiene:

$$(2) \qquad r_2 i = r_3 i'.$$

Dividiendo ordenadamente las igualdades (1) y (2), se tiene:

$$\frac{r_1 i}{r_2 i} = \frac{r_4 i'}{r_3 i'} \quad \text{o sea} \quad \frac{r_1}{r_2} = \frac{r_4}{r_3},$$

de donde

$$r_1 r_3 = r_2 r_4.$$

Por consiguiente: *cuando no pasa corriente por el galvanómetro, los productos de las resistencias opuestas son iguales.*

Semejante disposición se llama «puente de Wheatstone». Cuando la condición precedente se cumple, se dice que el puente está *equilibrado.*

Es evidente que estando equilibrado el puente, si se conocen tres de sus resistencias, se podrá deducir el valor de la cuarta.

Para medir una resistencia x por este método se emplean tres resistencias variables cuyos valores sean siempre conocidos, por ejemplo, tres cajas de resistencias A, B, C, y se unen a la resistencia que se trata de medir de modo que se forme un cuadrilátero; sobre una de las diagonales se dispone una pila y sobre la otra un galvanómetro.

Tomando valores cualesquiera en las cajas, el cuadro del galvanómetro se desvía; dichos valores se modifican quitando o poniendo clavijas en las cajas

hasta que el cuadro no se desvíe. Sean entonces a, b, c, las resistencias obtenidas.

Se tiene:

$$b \times x = a \times c,$$

de donde

$$x = \frac{a}{b} \times c.$$

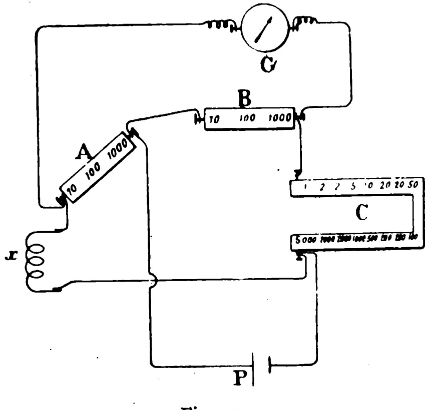


Fig. 42.

Para facilitar el cálculo se tomará, por ejemplo, para A y B dos cajas de 10, 100, 1000 ohms y la relación $\frac{a}{b}$ podrá tomar los valores: 1, 10, 100, $^1/_{10}$, $^1/_{100}$; para c se toma una caja de 11 110 ohms (fig. 42).

Caja-puente. — Los tres grupos de resistencias A, B, C están colocados en una misma caja, llamada «caja-

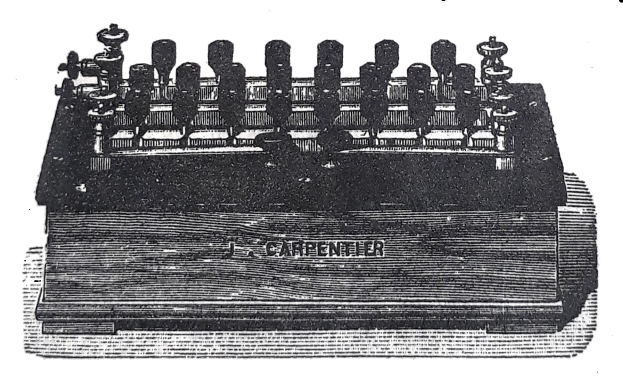


Fig. 43. — Caja-puente.

puente» (fig. 43), representada en esquema en la figu-

ra 44. Las conexiones que hay que establecer para hacer una medida, con la pila, el galvanómetro y la resistencia desconocida están indicadas cor líneas llenas en el esquema, viéndose que las cuatro resistencias *a*, *b*, *c*, *x* forman un cuadrilátero, y que el galva-

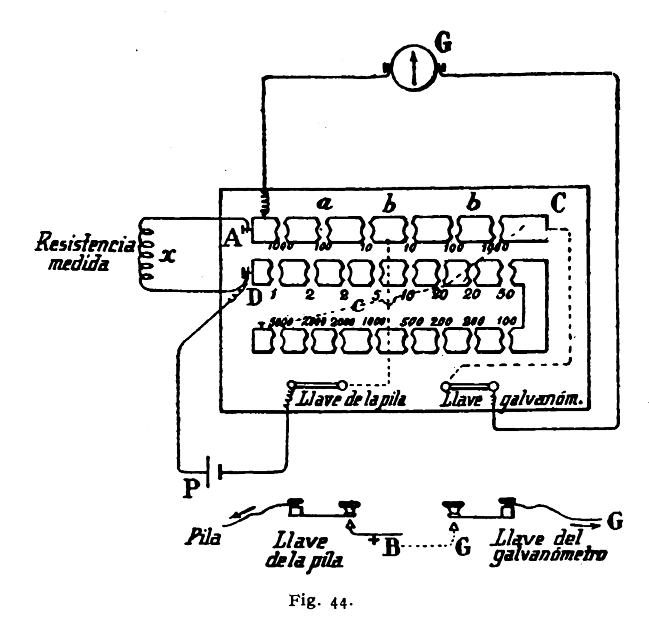


Fig. 44.

nómetro y la pila están colocados en las diagonales por medio de dos llaves correspondientes. Las conexiones exteriores están indicadas con líneas de puntos. Las resistencias *a* y *b*, cuyo conjunto constituye la *rama de proporción* del puente, están formadas cada una por tres resistencias de 10, 100, 1000 ohms, y la resistencia *c* o *rama de comparación* es una caja de 11110 ohms.

El galvanómetro está colocado sobre un soporte conveniente que lo aísla de toda vibración y a 1 metro aproximadamente de distancia de una mesa sobre la

cual hay: la caja-puente, la resistencia desconocida, la escala transparente y la lámpara, según dijimos anteriormente y según indica la figura 45.

Si no se tiene idea del orden de magnitud de la resis-

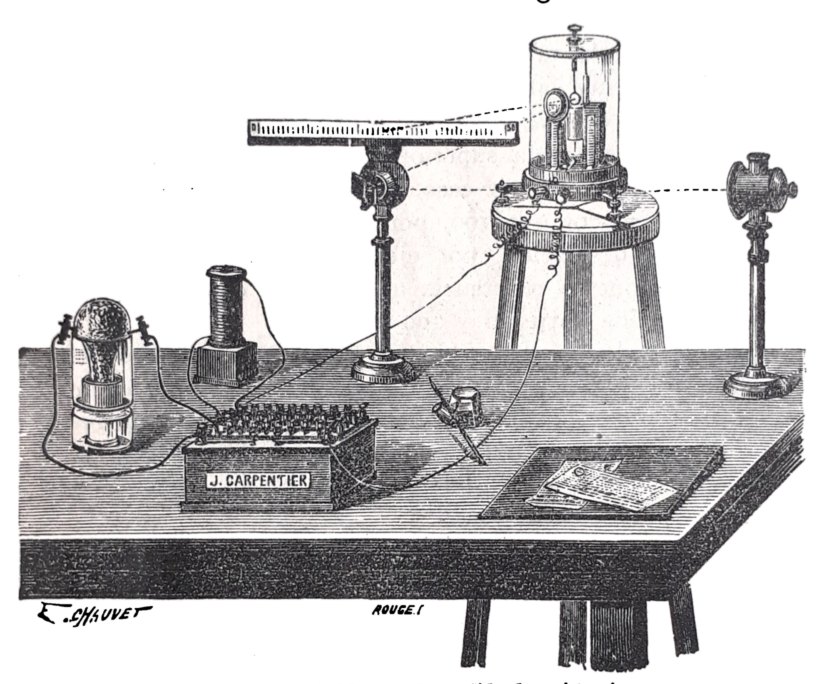


Fig. 45. — Instalación para la medida de resistencias.

tencia que se mide, se toma $a = 1000$ y $b = 1000$; es decir, que $\frac{a}{b} = 1$, y se toma para c un valor cualquiera, $c = 100$, por ejemplo. Se cierra entonces la llave de la pila, y manteniéndola cerrada, se cierra la del galvanómetro; supongamos que se observa una desviación del «spot» hacia la derecha. Se abre la llave de la pila, manteniendo cerrada la del galvanómetro hasta que la imagen quede inmóvil.

Se toma a continuación para c un valor muy diferente del primero, $c = 1\,000$, por ejemplo. Se opera como acabamos de indicar y se observa el sentido de la desviación. Supongamos que sea del mismo sentido que la primera, es decir, hacia la derecha; si es más grande que la primera, significa que para obtener el equilibrio hace falta una resistencia inferior a 100. En cambio, si es más pequeña, el equilibrio se obtendrá con una resistencia superior a 1000. Supongamos que estamos en el primer caso: tomaremos una resistencia bastante menor que 100, por ejemplo 20, y obtendremos una desviación, por ejemplo, a la izquierda; es evidente que la resistencia que dará el equilibrio está comprendida entre 20 y 100 ohms.

Tomando valores crecientes a partir de 20 ohms, se llegará a obtener para c dos valores diferentes entre sí en 1 ohm, que dan desviaciones de sentidos contrarios; supongamos, por ejemplo, que se obtiene con 51 una desviación a la izquierda y con 52 una desviación a la derecha; como

$$x = \frac{a}{b} \cdot c$$

y como hemos tomado $\frac{a}{b} = 1$, se deduce que la resistencia medida x está comprendida entre 51 y 52 ohms.

Para obtener un valor más aproximado, tomaremos $\frac{a}{b} = \frac{1}{100}$, es decir, $a = 10$, $b = 1\,000$, y tendremos:

$$x = \frac{c}{100}.$$

El valor de c que dará el equilibrio del puente estará entonces comprendido entre 5100 y 5200, es decir, que 5100 dará una desviación a la izquierda y 5200 una desviación a la derecha. Siguiendo ope-

rando como hemos dicho, se obtendrá el equilibrio, para $c = 5185$, por ejemplo, y se tendrá:

$$x = \frac{5185}{100} = 51{,}81 \text{ ohms.}$$

OBSERVACIÓN I. — Es fácil ver que si la resistencia medida es superior a 11110 ohms, habrá que tomar $\frac{a}{b} > 1$, y que si es pequeña será preciso tomar $\frac{a}{b} < 1$ por ejemplo, $\frac{a}{b} = \frac{1}{10}$ ó $\frac{a}{b} = \frac{1}{100}$.

OBSERVACIÓN II. — Es conveniente, al empezar la medida, para los primeros tanteos, shuntar el galvanómetro por una resistencia bastante pequeña para evitar las desviaciones excesivas. Este shunt se suprimirá cuando se esté a punto de conseguir el equilibrio.

Puente de hilo o lineal. — Se emplea con frecuencia un *puente de hilo*, representado esquemáticamente en la figura 46. *A B* es un hilo perfectamente calibrado que tiene exactamente la misma resistencia por unidad de longitud en toda su extensión, y que está tirante entre dos barras de cobre *C* y *D*.

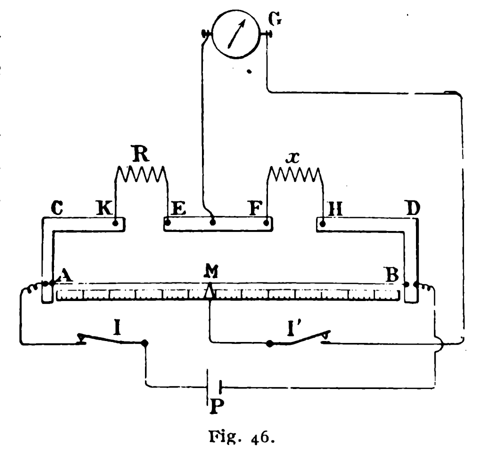


Fig. 46.

Un cursor *M* puede resbalar a lo largo de este hilo y establecer un contacto en cada uno de sus puntos; una

regla graduada ante la cual se mueve el cursor, permite medir las longitudes MA y MB, o bien da directamente para cada posición del cursor el valor de la relación $\frac{MB}{MA}$. La resistencia x que se mide se coloca entre los dos bornes F, H; una resistencia R convenientemente tomada está unida a los bornes K y E. El galvanómetro y la pila se disponen del modo indicado por la figura 46. Se corre el cursor M hasta que estando cerradas las llaves I e I' no se produzca ninguna desviación del cuadro del galvanómetro, en cuyo caso se tiene:

$$x \times \text{resistencia } AM = R \times \text{resistencia } BM,$$

de donde:

$$x = R \frac{\text{resistencia } BM}{\text{resistencia } AM}.$$

Como el hilo está calibrado, la relación entre las resistencias BM y AM es igual a la relación entre sus longitudes, y se tiene:

$$x = R \frac{BM}{AM}.$$

El valor de esta relación está escrito sobre la regla frente al índice del cursor M, o bien se deduce del valor de las longitudes.

La resistencia de comparación R se toma de modo que el cursor M no caiga demasiado cerca de ninguno de los extremos A, B; su valor debe, por consiguiente, ser poco diferente de la resistencia que se mide x.

Medida de pequeñas resistencias. — En los procedimientos anteriores, los extremos de los conductores que unen las resistencias conocidas entre sí y con la resistencia que se mide, están fijados con bornes, por

lo cual, a pesar de todas las precauciones que se tomen, se tienen resistencias de contacto que no son despreciables si la resistencia que se trata de medir es muy pequeña. Por ejemplo, si se quiere medir la resistividad de un metal o de una aleación, hay que emplear un método en que las resistencias de contacto no produzcan ningún efecto sobre el resultado, lo cual se consigue con el «doble puente de Thomson», que vamos a describir a continuación.

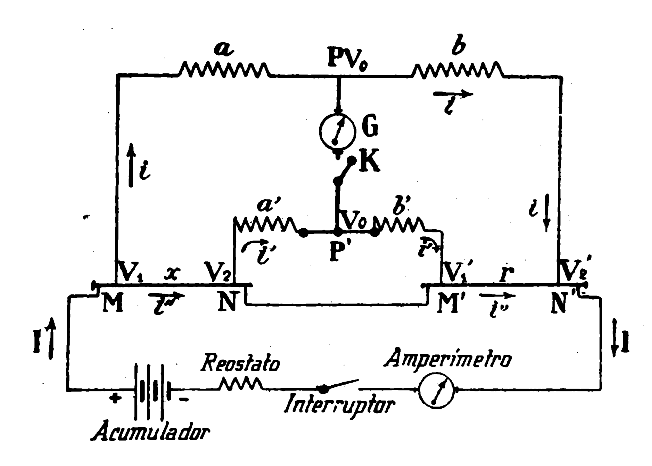


Fig. 47.

Un hilo metálico del cual se quiere conocer la resistividad se pone en serie con una resistencia perfectamente conocida, haciendo que lo recorra la corriente dada por una batería de acumuladores, regulable con un reostato. Los extremos M, N, M', N' de la resistencia x medida y de la resistencia conocida de comparación r, se unen por medio de resistencias variables a, b, a', b'; un galvanómetro G, con su llave K, está colocado entre los dos puentes ab, $a'b'$, del modo indicado en la figura 47.

Las resistencias de los dos puentes son tales, que se tiene constantemente $a = a'$, $b = b'$, y sus valores se regulan de modo que el galvanómetro siga en el cero cuando se baja la llave K. Cuando se cumple esta condición, los dos puentes P, P', entre los cuales está derivado el galvanómetro, están al mismo potencial, y como no pasa corriente alguna entre P y P', la corriente i es la misma en a y en b; análogamente, por a' y b' pasa una misma corriente i'. La corriente en MN es entonces la misma que en $M'N'$, pues aplicando la ley de Kirchhoff al vértice M se ve que la corriente en MN es $I - i$ (siendo I la corriente dada por el acumulador); del mismo modo, aplicando esta ley al punto N', se ve igualmente que la corriente en $M'N'$ es $I - i$ a la cual llamaremos i''.

Sean V_1, V_2, V'_1, V'_2 respectivamente los potenciales en los puntos M, N, y M', N', y sea V_0 el potencial de los puntos P, P'; se tendrá, según lo dicho:

$$V_1 - V_0 = ai$$
$$V_2 - V_0 = a'i'$$

de donde

$$V_1 - V_2 = ai - a'i', \quad \text{y como} \quad a = a',$$

resulta:

$$V_1 - V_2 = a\ (i - i')$$

o sea

(1) $$xi'' = a(i - i').$$

Del mismo modo, por ser V_0 superior a V'_1, y a V_2, se tendrá:

$$V_0 - V'_2 = bi$$
$$V_0 - V'_1 = b'i'$$

y como $b_1 = b'_1$, resultará:

$$V'_1 - V'_2 = b(i - i')$$

por lo cual:

(2) $$ri'' = b(i - i')$$

y dividiendo ordenadamente las igualdades (1) y (2):

$$\frac{x}{r} = \frac{a}{b} \quad \text{de donde} \quad x = r\frac{a}{b}.$$

Se ve que las resistencias en los contactos entre los conductores de unión y las pequeñas resistencias *MN*, *M'N'* no intervienen para nada.

Los diferentes constructores han formado puentes dobles, cuyo funcionamiento y empleo se comprenden perfectamente después de lo que acabamos de decir. En general, las resistencias *a*, *b*, *a'*, *b'* se toman sobre un reostato circular doble (fig. 48), cuyas resistencias 1, 2, 3, 4... son respectivamente iguales a 1', 2', 3', 4'..., de modo que cuando la maneta ocupa, por ejemplo, la posición que representa la figura, las resistencias *a* y *a'* son iguales, así como las *b* y *b'*, y estas resistencias son tales que la relación $\frac{a}{b}$ toma los valores 100; 10; 1; 0,1; 0,01, marcados frente a la maneta, en las posiciones correspondientes.

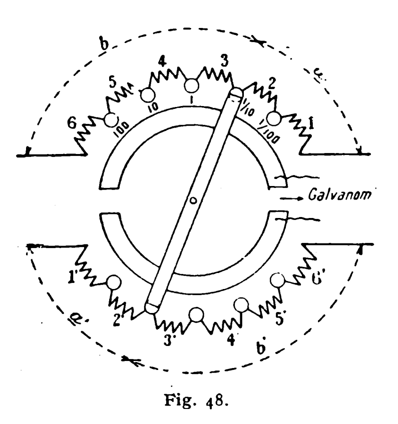


Fig. 48.

Medida de resistencias líquidas. — El procedimiento anterior no puede aplicarse a los líquidos, porque bajo la influencia de las corrientes continuas que los atraviesan, desarrollan en general una fuerza electromotriz de polarización que produce un aumento aparente de resistencia. Sin embargo, se puede emplear el método del puente sustituyendo la corriente continua de la pila por corrientes alternas, y el galvanómetro por un teléfono. Si las condiciones de equilibrio no están satisfechas, las corrientes alternas pasan por el carrete del teléfono, que acusa claramente al oído la existencia de estas corrientes y cuanto más cerca se esté de las condiciones de equilibrio, menos se va percibiendo el sonido.

Por consiguiente, efectuando las mismas operaciones que anteriormente, se buscan los valores de las resistencias para los cuales el teléfono no da sonido alguno,

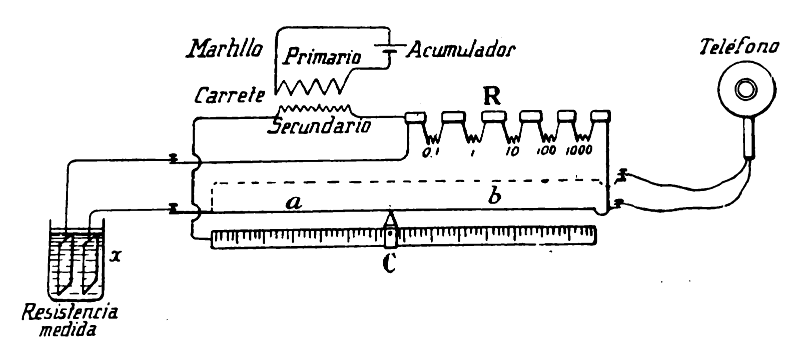


Fig. 49. — Puente de Kohlrausch.

o el menor sonido posible. Para obtener las corrientes alternas se sustituye la pila por el secundario de un carrete Ruhmkorff cuyo primario esté alimentado por un acumulador.

Este método se debe a Kohlrausch, y algunos cons-

tructores expenden aparatos montados para estas medidas, con el nombre de «puente de Kohlrausch». La figura 49 representa en esquema este puente con las conexiones que hay que establecer, y la figura 50 lo representa tal como se encuentra en los laboratorios.

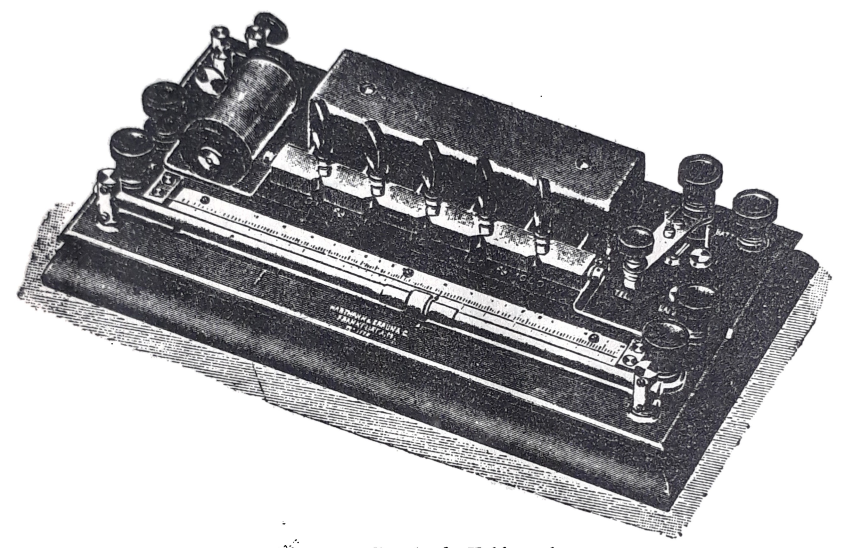


Fig. 50. — Puente de Kohlrausch.

Cuando para una resistencia de comparación R y la posición C del cursor, el teléfono no da ningún sonido se tiene:

$$Ra = bx, \quad \text{de donde} \quad x = R\frac{a}{b}.$$

También se puede efectuar esta misma medida uniendo al puente la resistencia polarizable o sometida a la influencia de corrientes parásitas, por medio de un inversor de anillas, movido por un mecanismo de relojería. Las corrientes perturbadoras se invierten con rapidez en la resistencia medida, con lo cual se

anula su influencia. Se opera con el puente ordinario.

«La Compagnie pour la fabrication des compteurs» construye un aparato de esta clase, con el nombre de

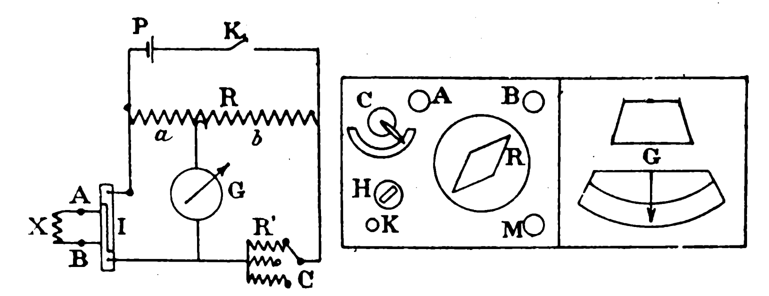


Fig. 51.

Telurómetro Berland, que es el representado por el esquema de la figura 51: *X* es la resistencia que se trata de medir; *I* el inversor de anillas movido por un mecanismo de relojería; *R'* las resistencias de comparación, una de las cuales está intercalada en el puente por medio del conmutador *C*; *R* el reostato circular con cuyo cursor se puede variar la relación de las resistencias del brazo o ramal de comparación; *P* es una pila seca; *H* la llave para dar cuerda al mecanismo de relojería, y *M* la llave de arranque o detención del movimiento.

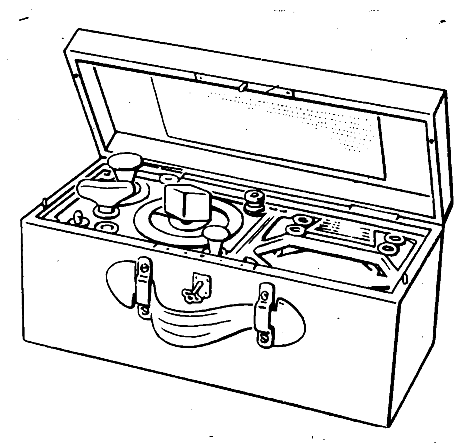


Fig. 52. — Telurómetro Berland.

Cuando el galvanómetro sigue en el cero, bajando la llave K se tiene $X = R' \times \frac{a}{b}$.

El valor de la relación $\frac{a}{b}$ está dado por el índice de la maneta del reostato R.

En la figura 52 se ve el *Telurómetro* en perspectiva.

Aplicación a la medida de la resistencia de la toma de tierra de un pararrayos. — Cerca de la toma de tierra P del pararrayos se establecen otras dos tomas P_1 y P_2, y se miden con el aparato que hemos descrito las siguientes resistencias: la resistencia entre P y P_1, que llamaremos a; la resistencia entre P y P_2, igual a b, y la resistencia entre P_1 y P_2, que designaremos con c (fig. 53).

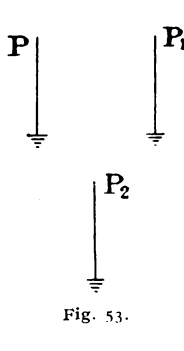


Fig. 53.

Llamando x, y, z a las resistencias de P, P_1 y P_2 con la tierra, se tiene:

$$(1) \qquad x + y = a$$
$$(2) \qquad x + z = b$$
$$(3) \qquad y + z = c.$$

Sumando ordenadamente (1) y (2) se tiene:

$$2x + (y + z) = a + b,$$

y sustituyendo $y + z$ por c, resulta:

$$2x + c = a + b$$

de donde:

$$x = \frac{a + b - c}{2}.$$

EJERCICIOS

1.º Valiéndose de un puente montado con tres cajas de resistencia:

1.º Medir una pequeña resistencia;

2.º Medir las resistencias de tres lámparas de incandescencia, por ejemplo, de 10, 16 y 32 bujías;

3.º Agrupar estas tres lámparas en serie y medir la resistencia del grupo; comprobar que esta resistencia es igual a la suma de las resistencias de las tres lámparas medidas por separado;

4.º Agrupar las tres lámparas en paralelo y comprobar que la conductancia del grupo es igual a la suma de las conductancias de las tres lámparas.

2.º Por medio de la caja-puente:

1.º Determinar los valores de tres resistencias *x*, *y*, *z*, agrupadas en estrella, cuyo centro *O* se supone inaccesible; para ello se miden sucesivamente las resistencias entre los bornes *A* y *B*, *B* y *C*, *C* y *A*. Comprobar los resultados obtenidos midiendo separadamente *x*, *y*, *z* (fig. 54);

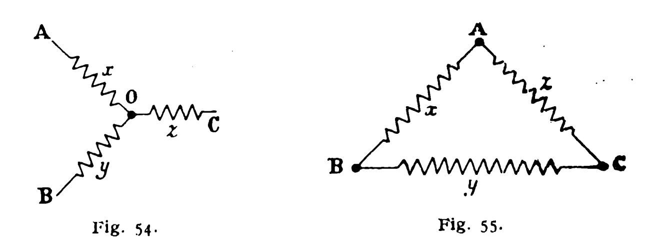


Fig. 54. Fig. 55.

2.º Determinar los valores de tres resistencias *x*, *y*, *z* agrupadas en triángulo, midiendo sucesivamente las resistencias entre los extremos *A* y *B*, *B* y *C*, *C* y *A* (fig. 55). Comprobar los resultados obtenidos;

3.º Determinar el coeficiente de aumento de resistencia con la temperatura, de algunos metales o aleaciones.

Se tendrá:

$$R_{t'} = R_t\,[1 + x\,(t' - t)]; \qquad x = \frac{R_{t'} - R_t}{R_t\,(t' - t)}$$

siendo $R_{t'}$ y R_t las resistencias a las temperaturas t y t', y x el coeficiente de aumento de resistencia con la temperatura.

Según que la resistividad del metal de que esté formado el hilo sea grande o pequeña, se usará una caja ordinaria de puente o bien el puente doble con dos cajas.

El hilo del metal de que se trate se arrolla (después de haberlo doblado) sobre un tubo de vidrio *A*; este tubo se introduce en otro tubo *CD*, y el intervalo comprendido entre ambos se llena de aceite. El conjunto de estos tubos se coloca dentro de un cilindro de cobre lleno de agua, que se podrá hervir mediante un mechero; un termómetro *T* da la temperatura del agua (fig. 56).

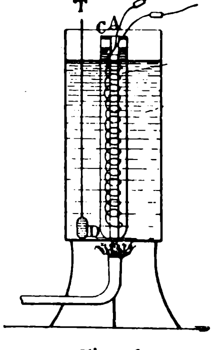


Fig. 56.

a) Medir en frío la resistencia del hilo considerado, anotando la temperatura t dada por el termómetro.

b) Hacer que hierva el agua y mientras dura la ebullición medir la nueva resistencia del hilo a la temperatura *T* indicada por el termómetro.

Deducir de aquí los coeficientes de aumento de resistencia con la temperatura.

Se preparan tres tubos: sobre uno se arrolla un hilo de hierro, sobre otro un hilo de cobre y sobre el tercero un hilo de constantán.

3.º Puente de hilo o lineal

Bastará para realizar el puente, construir el aparato representado por la figura 57.

MN es un hilo de maillechort de 0,4 mm. a 0,6 mm. de diámetro; *PQ* es una regla de latón graduada, sobre la

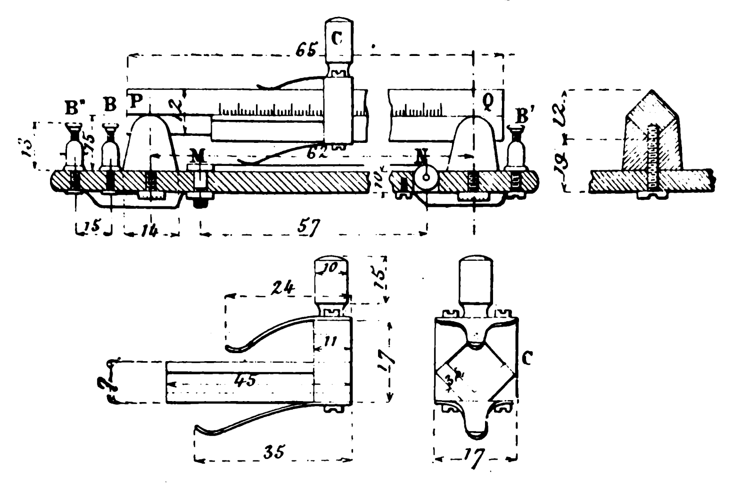


Fig. 57.

cual puede deslizarse el cursor *C* que se apoya sobre el hilo, en el cual determina un contacto *D* con la regla; *B*, *B'*, *B''*, son los bornes.

a) *Medida de una resistencia pequeña*

Se efectuará el siguiente montaje (fig. 58): se toma sobre la caja *HK* una resistencia *R* del mismo orden de magnitud que la resistencia que se quiere medir *x*, se corre el cursor *C* hasta que el cuadro del galvanómetro no se desvíe y se lee sobre la regla el valor de la relación $\frac{ND}{MD}$:

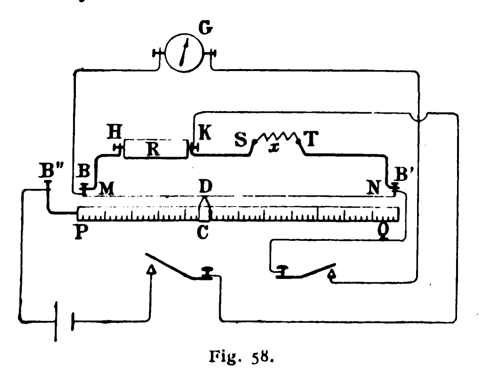


Fig. 58.

$$x = R \times \frac{ND}{MD}.$$

OBSERVACIÓN.— Es evidente que las resistencias de los hilos de conexión BH, KS y TB' deben ser despreciables comparadas con x y R, que también son muy pequeñas. Las resistencias de contacto de los hilos de unión y de las resistencias x y R deben ser igualmente despreciables, lo cual hace necesarias las soldaduras en los puntos de contacto.

b) *Medida de una resistencia líquida*

La resistencia líquida está formada por un tubo en U de poca longitud (fig. 59), lleno, por ejemplo, de una solución de sulfato de cobre en la cual se sumergen dos láminas de cobre.

1.º Se opera como en el caso precedente, comprobándose que la medida es imposible, no pudiéndose obtener el equilibrio del puente;

2.º A continuación se sustituye el galvanómetro por un teléfono y la pila por el secundario de un carrete de Ruhmkorff, como indica el esquema de la figura 60. Cuando el sonido dado por el teléfono es mínimo, se tiene:

Fig. 59.

$$x = R \times \frac{ND}{MD}.$$

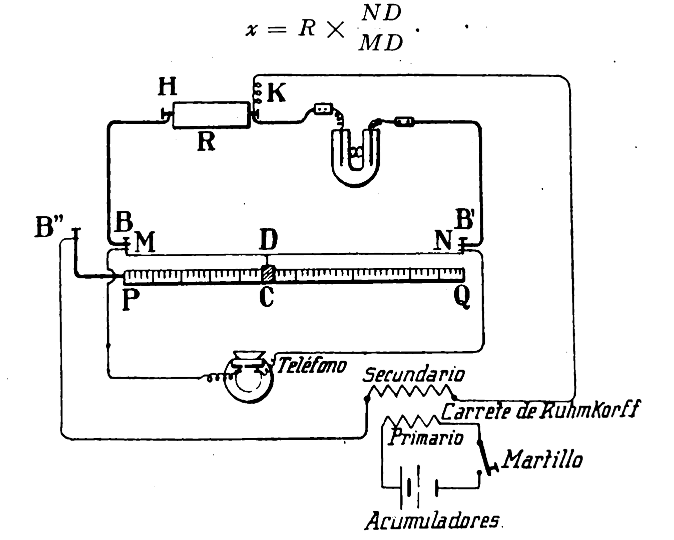


Fig. 60.

Será muy cómodo para estos ejercicios y para otros muchos que encontraremos más adelante, construir un aparato compuesto de dos hilos extendidos sobre una regla graduada y provisto cada úno de un cursor. Estas dos reglas y los dos hilos estarán fijos sobre una plancha como se ve en la figura 57.

c) *Medida de la resistividad de un metal con el puente doble montado con dos cajas-puente ordinarias*

Se hace el montaje indicado por la figura 61 tomando, por ejemplo, como resistencia de comparación r un shunt

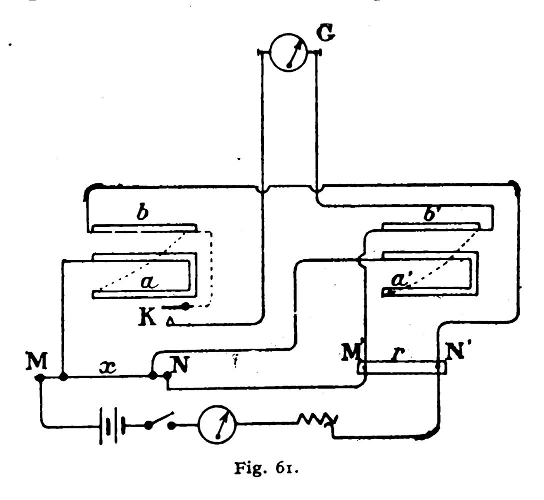


Fig. 61.

de amperímetro cuyo valor sea muy pequeño y exactamente conocido. Se toma $a = a'$, $b = b'$ y $a + b$ bastante grande para que las resistencias de contacto en MN, $M'N'$ sean despreciables comparadas con este valor.

CAPÍTULO III

Aplicación del método del puente a la busca de tierra

Un gran número de explotaciones eléctricas públicas están formadas por una red en que un conductor está unido a tierra; por ejemplo, alumbrado por distribución a tres hilos con hilo neutro a tierra, tranvías, etc.

Es evidente que las grandes averías sobrevienen en la explotación cuando otro conductor toca a la tierra, ya directamente produciendo un cortocircuito franco, ya por medio de una resistencia más o menos grande. En el primer caso, los aparatos de seguridad acusan rápidamente la existencia de tierra; en el segundo caso, los indicadores de tierra, las anomalías en el funcionamiento de la instalación o bien ciertos ensayos periódicos señalan este defecto.

Es necesario remediarlo, y por consiguiente encontrar el sitio en que se ha producido la tierra.

Método del lazo. — Supongamos que por los procedimientos que indicaremos más adelante se llegue a descubrir que el defecto está sobre una línea comprendida entre dos puntos *A*, *B* y que cerca de esta línea se encuentra otra sin defecto (fig. 62).

I. *Caso en que los dos conductores próximos tienen el mismo diámetro.* — Se procede del modo siguiente:

En uno de los extremos, B por ejemplo, se unen los dos hilos (o conductores) de modo que queden enlazados, y en el otro extremo se colocan dos resistencias variables M, N. Estas dos resistencias están unidas respectivamente a los dos

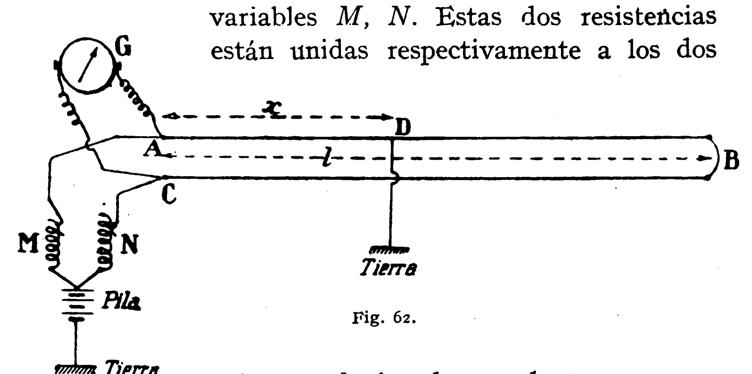


Fig. 62.

extremos de los dos conductores y por sus otros extremos están unidas a un polo de una batería de pilas cuyo otro polo está unido a tierra.

Por último, un galvanómetro está unido a los extremos A y C de los dos conductores.

Sea D el punto buscado y x su distancia al punto A, y llamemos l a la longitud AB, expresada en metros.

Se ve, por el montaje descrito, que se ha formado un puente cuyas cuatro resistencias son:

$$M, \quad AD, \quad DBC \quad \text{y} \quad N.$$

Se hacen variar las resistencias M y N hasta obtener valores para los cuales el galvanómetro no sufra ninguna desviación, y sean a y b estos valores; siendo K la resistencia por metro de los conductores, las cuatro resistencias anteriores son:

$$a, \quad Kx, \quad (2l - x)K \quad \text{y} \quad b.$$

Luego se tiene:

$$a \times K(2l - x) = Kx \times b,$$

o bien

$$2alK - axK = Kbx,$$

$$x(b + a) = 2al,$$

$$x = \frac{2al}{b + a}.$$

Así se tiene en metros la distancia del punto A al punto en que está la tierra.

OBSERVACIÓN. — El lazo B debe ser de resistencia despreciable (el hilo o cable y los contactos); lo mismo debe verificarse para las conexiones AM y CN, y en caso contrario han de tenerse en cuenta, lo cual es fácil. El galvanómetro y las resistencias deben estar cuidadosamente aislados de la tierra.

II. *Caso en que los dos cables próximos no tienen el mismo diámetro.* — Puede suceder que los dos cables próximos no tengan el mismo diámetro. En este caso se busca cuál sería la longitud de un conductor que tuviera la misma resistencia que el segundo hilo (hilo sin defecto) con el mismo diámetro que el hilo sobre el cual está la tierra. Supongamos, por ejemplo, que en el caso anterior, el conductor AB tenga un diámetro d, y CB un diámetro d'. Sea l' la longitud de un conductor que tenga la misma resistencia que CB, pero con el diámetro d de AB. Se sabe que para un mismo metal, la resistencia de un conductor es proporcional a su longitud e inversamente proporcional a su sección, y por consiguiente al cuadrado de su diámetro.

Luego si el diámetro de CB, en lugar de ser d' fuera 1, para una misma resistencia su longitud habría de ser d'^2 veces más pequeña, o sea $\frac{l}{d'^2}$. Si dicho diá-

metro, en vez de ser 1 fuera d, la longitud debería ser d^2 veces más grande, es decir, $l\frac{d^2}{d'^2}$.

Por lo tanto, el conductor CB, de diámetro d' y de longitud l, tiene la misma resistencia que un conductor de longitud:

$$l' = l\frac{d^2}{d'^2}$$

y de diámetro d.

Luego si llamamos K a la resistencia por metro de un conductor de diámetro d, las cuatro resistencias que constituyen el puente formado son:

$$a, \qquad Kx, \qquad K\left[(l - x) + l\frac{d^2}{d'^2}\right], \qquad b,$$

y se tiene:

$$a \times K\left(l - x + l\frac{d^2}{d'^2}\right) = b \times Kx$$

o bien:

$$al - ax + al\frac{d^2}{d'^2} = bx$$

o sea:

$$x(a + b) = al\left(1 + \frac{d^2}{d'^2}\right),$$

$$x(a + b) = al\frac{d^2 + d'^2}{d'^2},$$

de donde:

$$x = \frac{al}{a + b} \times \frac{d^2 + d'^2}{d'^2}$$

OBSERVACIÓN. — Se presenta con frecuencia el caso en que uno de los conductores está formado por dos

partes de diámetros diferentes. Se resuelve la cuestión del mismo modo que en los casos anteriores, refiriendo todas las líneas al mismo diámetro; se calculan las longitudes que habrían de tener estas líneas para que sus resistencias respectivas fueran las mismas con es nuevo diámetro. También hay que tener en cuenta, de este modo, los cables de conexión.

Empleo de la caja-puente Carpentier.—Para buscar la tierra puede utilizarse la caja-puente de Carpentier que ya hemos descrito. Para ello se establece el montaje representado en el esquema de la figura 63.

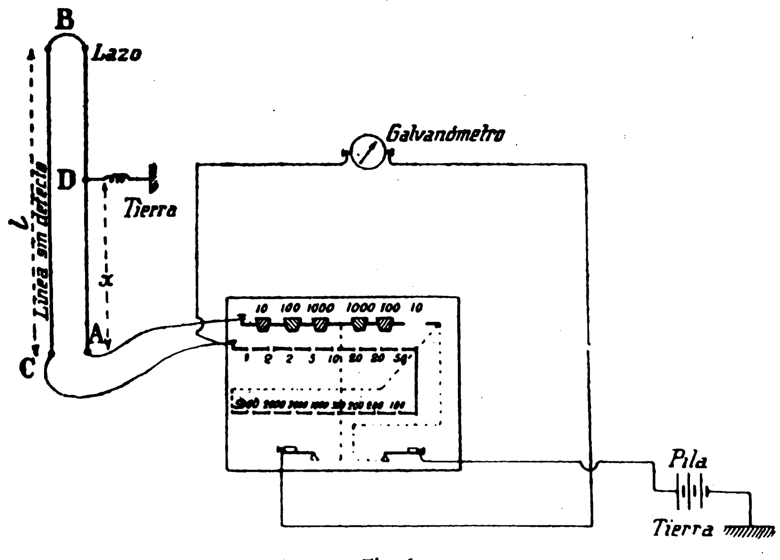


Fig. 63.

Se dejan todas las clavijas de la parte izquierda de la rama de proporción y se toma sobre la otra rama la resistencia de 100 ohms, por ejemplo. Se establecerá el equilibrio con la rama de comparación.

Si R es la resistencia obtenida, el defecto estará a una distancia x tal que:

$$Kx \times R = K(2l - x) \times 100$$

o sea:

$$Rx = (2l - x)\,100,$$
$$Rx = 100 \times 2l - 100x,$$

de donde

$$x = \frac{100}{R + 100} \times 2l.$$

Observación. — También podría utilizarse el puente de hilo, y el montaje estaría representado por la figura 64. Entonces se tendría:

$$Kx \times b = (2Kl - xK)a,$$
$$bx = (2l - x)a,$$
$$\frac{x}{2l - x} = \frac{a}{b} \quad \text{o bien} \quad \frac{x}{2l} = \frac{a}{a + b}.$$

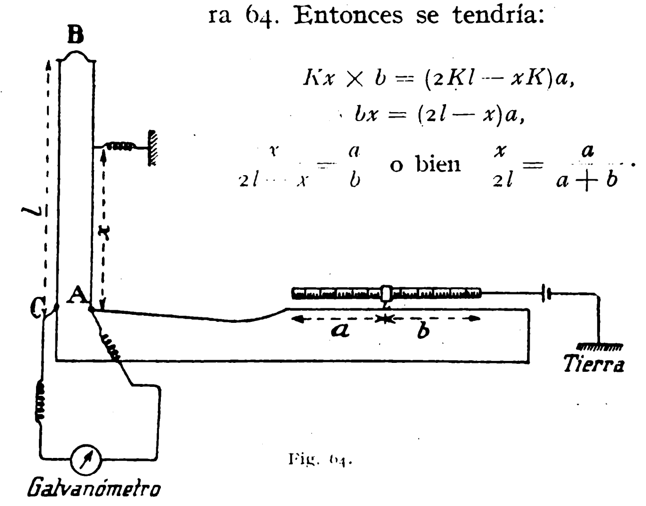


Fig. 64.

Ejemplo. — Se ha notado una tierra en una red de alumbrado; después de una serie de ensayos preliminares, el defecto ha quedado localizado en la parte comprendida entre las cajas de unión A, B, C, es decir, sobre una de las tres ramificaciones AD, DB, DC. Se trata de determinar su posición exacta (fig. 65).

La ramificación *AD* tiene una longitud de 40 metros y los dos conductores tienen un diámetro de 6 milímetros. *DB* tiene una longitud de 10 metros; diámetro, 7 milímetros. *DC* tiene 15 metros; diámetro, 2,5 milímetros.

La caja-puente y el galvanómetro se llevan cerca de la caja *A*, y en *B* se enlazan los dos conduc-

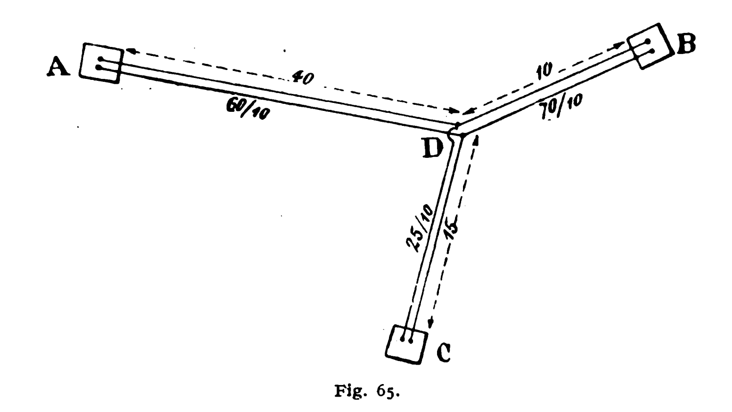


Fig. 65.

tores. Estableciendo las conexiones del modo indicado se encuentra para la resistencia *R* un valor de 136 ohms.

El conductor que tuviera la misma resistencia que *DB*, con un diámetro de 6 milímetros en vez de 7, tendría una longitud l' definida por la relación:

$$l' = 10 \times \frac{60^2}{70^2} = 7{,}35 \text{ metros.}$$

El sistema de conductores *ADB* obra como un solo conductor de 7 milímetros de diámetro y de una longitud igual a:

$$40 + 7{,}35 = 47{,}35 \text{ metros.}$$

Por consiguiente, el defecto está a una distancia x de A, dada por la relación:

$$x = \frac{100}{136 + 100} \times 2 \times 47{,}35,$$

$$x = \frac{9470}{236} = 40 \text{ metros.}$$

La tierra que se busca está en D o sobre el conductor DC. Se llevan los aparatos a D y se disponen

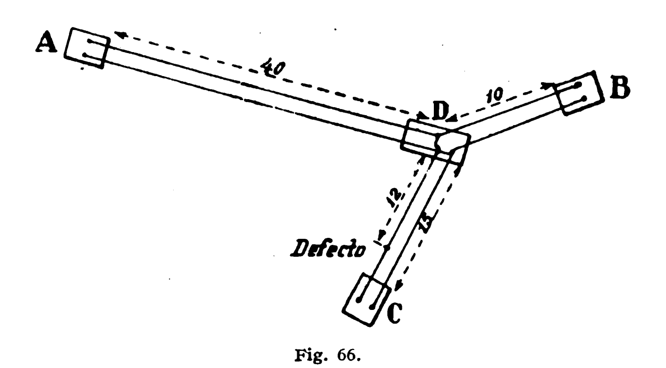


Fig. 66.

como en A, enlazando los extremos C; el equilibrio se encuentra en este caso para una resistencia de 150 ohms (fig. 66).

El defecto está, por lo tanto, a una distancia x de D tal, que:

$$x = \frac{100}{150 + 100} \times 2 \times 15,$$

$$x = \frac{3000}{250} = 12 \text{ metros.}$$

OBSERVACIÓN. — Si el punto D no es accesible, lo cual sucede con mucha frecuencia en la práctica, se puede hacer la medida entre A y C ó B y C, deducién-

dose el valor de x. Se puede efectuar la medida sucesivamente entre A y C, y B y C, confrontando después los resultados obtenidos.

Caso en que no haya ningún hilo sano cerca del hilo sobre el que hay la tierra. — Puede suceder que no se disponga, como en el caso anterior, de un hilo sin defecto cerca del conductor sobre el cual se sabe que hay una tierra. En este caso, se procede del modo siguiente:

Se aísla uno de los extremos B y se disponen en el otro extremo A, tres resistencias variables M, N, P.

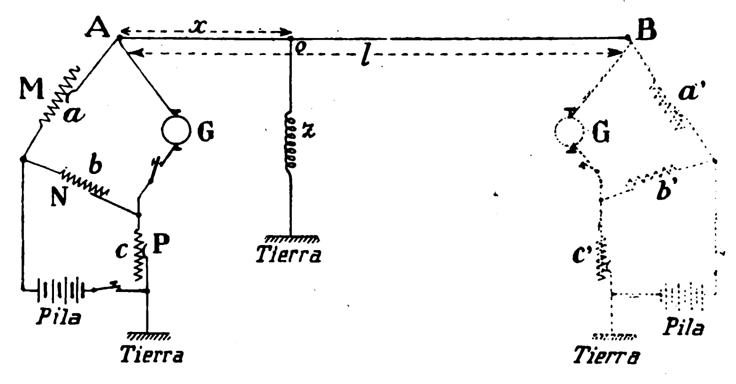


Fig. 67.

Se coloca una pila, un galvanómetro y las tres resistencias M, N, P, del modo que indica la figura 67. Se ve que se forma un puente cuyas cuatro resistencias son: M; la resistencia del conductor AO (parte comprendida entre el extremo A y el defecto O); la resistencia del defecto, z; y por último las P y N.

Se regulan las resistencias M, N, P de modo que estando cerrada la llave de la pila, la aguja del galvanómetro no sufra ninguna desviación cuando se cierre

la llave correspondiente. Sean a, b, c los valores obtenidos para estas tres resistencias; sea x la distancia AO buscada y l la longitud de la línea AB.

Las cuatro resistencias que dan el equilibrio del puente son:

$$a, \qquad Kx + z, \qquad c, \qquad b,$$

siendo K la resistencia por metro de la línea. Se tiene, por consiguiente:

$$ac = (Kx + z)\ b. \tag{1}$$

En esta igualdad hay dos incógnitas, x y z. Se necesita, por lo tanto, otra ecuación.

Para obtenerla, se aísla el extremo A y se hacen en B las mismas operaciones que se hicieron en A. Sean a', b', c' las tres resistencias que producen el equilibrio. Las cuatro resistencias que constituyen el puente son:

$$a', \qquad K(l - x) + z, \qquad c', \qquad b'$$

teniéndose:

$$a'c' = [K(l - x) + z]\ b'. \tag{2}$$

Eliminando z entre las ecuaciones (1) y (2), se deduce la distancia buscada x.

Se puede también emplear la caja-puente, y en este caso, el montaje sería el indicado en el esquema de la figura 68.

Observación. — Estos métodos raramente dan buenos resultados en las redes de alumbrado en que las resistencias de los conductores son muy pequeñas, a veces despreciables, comparadas con la resistencia del defecto (de donde proviene el error relativo considerable); además, las resistencias de los defectos varían de un momento a otro (con la humedad). Por último,

muchas veces hay fuerzas electromotrices en el defecto (humedad en la tierra: pila hierro o plomo y cobre).

Ordinariamente los cables están provistos de *hilos pilotos* que sirven para saber en una estación la ten-

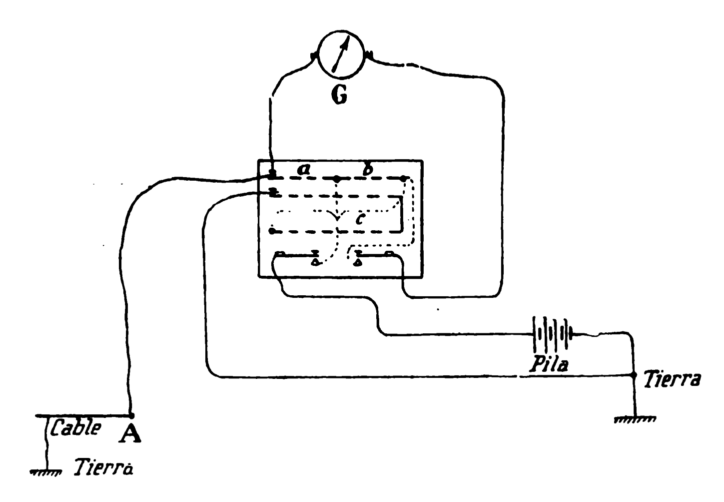


Fig. 68.

sión que hay entre los extremos de los primeros; estos hilos finos son de resistencia suficiente para que se les pueda aplicar los métodos anteriores, pero es preciso que también se produzca en ellos el mismo defecto, lo cual puede no suceder. El señor Carpentier ha salvado este inconveniente agregando un *hilo de prueba* formado por un hilo fino, arrollado en hélice entre dos tiras de papel o de tela por debajo de los conductores aislados, de modo que los defectos que se produzcan en

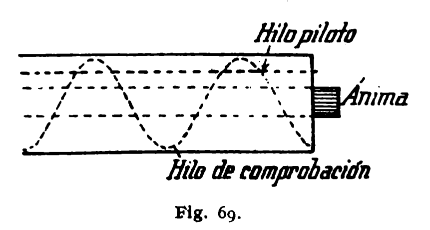


Fig. 69.

el ánima del cable interesen desde luego al hilo de prueba (fig. 69). El hilo de prueba y los hilos pilotos terminan, como los cables, en las cajas de conexión, donde se aíslan cuidadosamente.

Empleo del puente doble. — Siendo en general muy débiles las resistencias del cable y de la tierra, hay interés en emplear el doble puente de Thomson.

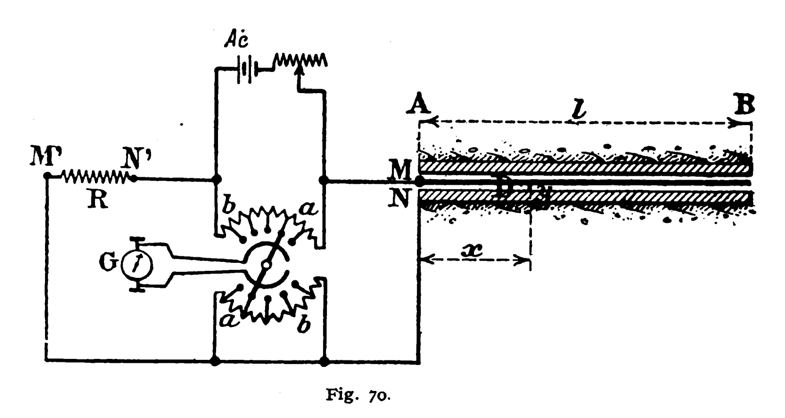


Fig. 70.

El montaje es entonces el indicado en la figura 70. Montado el aparato en la extremidad A del cable, se regulan la resistencia de comparación R y la relación $\frac{a}{b}$ de las resistencias del puente, de manera que la aguja del galvanómetro G permanezca en cero cuando se aprieta el botón.

Sea x la distancia de la avería D a la extremidad A, ρ la resistencia métrica del cable, ρ' la resistencia métrica de la envuelta e y la resistencia de la avería. Se ha visto (pág. 41) que:

$$(1) \qquad \frac{\rho x + \rho' x + y}{R} = \frac{a}{b}.$$

Se repite la misma medida en la extremidad B del cable conservando la misma relación $\frac{a}{b}$ y sea R' el valor de la resistencia de comparación necesario para establecer el equilibrio del galvanómetro. Se tiene entonces:

$$(2) \qquad \frac{\rho(l-x)+\rho'(l-x)+y}{R'}=\frac{a}{b}.$$

De la igualdad (1) se deduce:

$$x(\rho+\rho')+y=\frac{aR}{b},$$

de donde:

$$y=\frac{aR}{b}-x(\rho+\rho')=\frac{aR-bx(\rho+\rho')}{b}.$$

Llevando este valor a la igualdad (2) se tendrá:

$$l(\rho+\rho')-x(\rho+\rho')+\frac{aR-bx(\rho+\rho')}{b}=\frac{aR'}{b},$$

o bien:

$$bl(\rho+\rho')-bx(\rho+\rho')+aR-bx(\rho+\rho')=aR',$$
$$2bx(\rho+\rho')=a(R-R')+bl(\rho+\rho'),$$
$$x=\frac{a(R-R')+bl(\rho+\rho')}{2b(\rho+\rho')},$$

y finalmente:

$$x=\frac{l}{2}+\frac{a}{b}\cdot\frac{R-R'}{2(\rho+\rho')}.$$

Se ve que si $R=R'$, $x=\frac{l}{2}$, o sea que la avería se encuentra exactamente en el punto medio del cable. Si R es mayor que R', la avería se encuentra más allá de la mitad a partir de A, y si R es menor que R', más

acá de la mitad a partir de A. La distancia a A es en este último caso:

$$x = \frac{l}{2} - \frac{a}{b} \cdot \frac{R' - R}{2(\rho + \rho')}.$$

Método rápido con un teléfono.—Este procedimiento permite localizar la avería de un cable subterráneo sin que sea necesario recurrir a ningún aparato de medida. La sensibilidad es menor, sin duda, pero es más rápido: basta disponer de un manantial de corriente alterna que dé una tensión de 220 volts, aproximadamente, con una frecuencia corriente de unos 50 períodos por segundo.

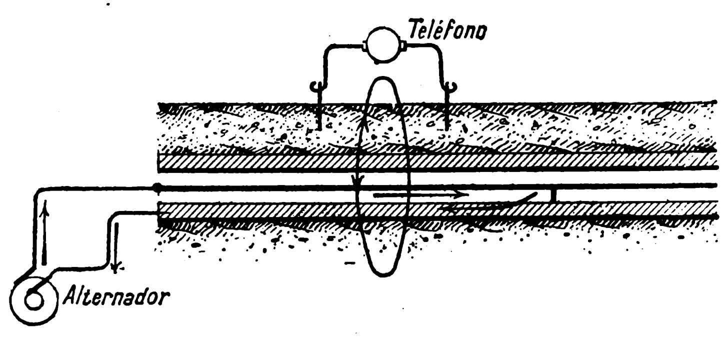


Fig. 71.

Se conectan el ánima del cable y la envuelta a las escobillas de un alternador de manera que se obtenga una corriente de 20 a 30 amperes, y se pasa a lo largo del cable un receptor telefónico unido a dos tomas de tierra por un conductor de 5 a 10 metros de longitud. Se hincan en el suelo en la dirección del cable las dos tomas de tierra: si se percibe un sonido es que aun no nos encontramos en la región en que el cable está en contacto con tierra; cesa de oírse desde el momento en que se ha pasado el lugar de la avería. En efecto, el conductor, el receptor y la porción de tierra comprendida

entre los dos piquetes de toma constituyen un circuito cerrado: la corriente alterna que recorre el cable crea líneas de fuerza concéntricas, cuyos planos son verticales, que cortan al plano del circuito, y, variando el flujo magnético que atraviesa el circuito, induce corrientes en el receptor telefónico.

Cuando se pasa más allá de la avería, se llega a una región de cable que no está atravesado por corriente alguna y cesa el ruido del teléfono.

EJERCICIOS

1.° Buscar una tierra: método del lazo

Las dos líneas se representan por dos hilos de maillechort de diámetros diferentes, sobre los cuales se puede tomar un contacto en un punto cualquiera por medio de un

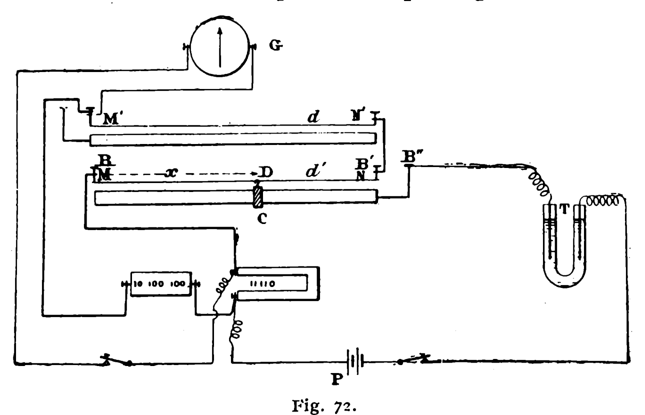


Fig. 72.

cursor móvil a lo largo de una regla graduada. Estos dos hilos se montan como indican los esquemas de la figura 57.

Para la facilidad del montaje, se representa la tierra por un tubo T lleno de sulfato de cobre en el que se sumergen dos láminas de cobre. Sobre uno de los hilos, MN por ejemplo (fig. 72), de diámetro $d = 0{,}4$ mm. se toma una

tierra en un punto D determinado por la posición del cursor C, estando la regla unida al tubo T por el borne B''. Se enlaza la línea MN con $M'N'$, de diámetro $d' = 0{,}6$ mm. y se opera del modo indicado, lo cual permite determinar la distancia MD del extremo M al defecto. Como se podrá leer sobre la regla PQ esta misma longitud, será posible comprobar el resultado obtenido y darse cuenta del grado de aproximación que resulta. En la figura se ve este montaje representado en conjunto.

2.º Buscar una tierra sobre una sola línea

La línea está representada por el hilo MN y la tierra por una resistencia T. Un punto D del hilo se pone en comunicación con tierra, uniendo, por el borne B'' y la

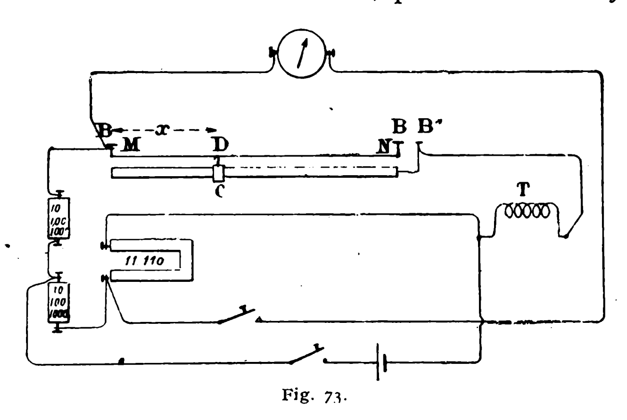


Fig. 73.

regla, el punto D con T. Por medio de tres cajas, por ejemplo: dos cajas de 10, 100, 1 000 y una caja de 11 100 ohms, dispuestas como indica el esquema de la figura 73, se obtendrá un puente que se equilibrará. Se repite el montaje en el extremo N y se deducirá de estas dos medidas la distancia x del extremo M al defecto D. Se comprueba el resultado obtenido leyendo sobre la regla la longitud MD.

Observación. — También puede representarse la tierra por un tubo lleno de sulfato de cobre, en vez de la resis-

tencia metálica T; en este caso se observará que es imposible obtener el equilibrio del galvanómetro a causa de la fuerza electromotriz desarrollada.

3.º Buscar el punto de contacto entre dos líneas

Sean MN, $M'N'$ dos líneas que comunican entre sí, a una distancia x de los puntos M, M', distancia que es preciso determinar. Se colocan entre los extremos M, M' tres cajas de resistencias A, B, C, con una pila P y un galvanómetro G, como indica la figura 74. Supongamos las dos líneas de igual diámetro y de la misma longitud l, y sea K su resistencia por unidad de longitud, es decir, por metro.

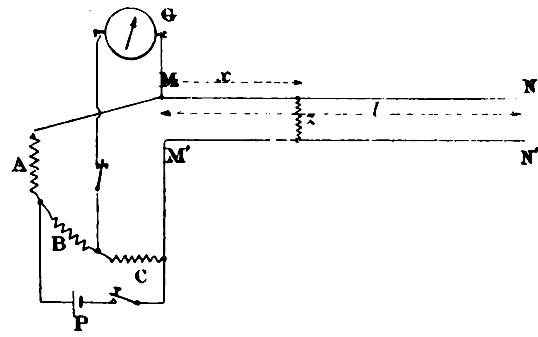


Fig. 74.

Las resistencias de las cajas se gradúan de modo que no pase corriente alguna por el galvanómetro; sean a, b, c, las resistencias obtenidas; se tiene:

$$(1) \qquad (2Kx + z)b = ac,$$

siendo z la resistencia que une ambas líneas La misma operación se repite en los extremos N, N'; sean a', b', c' las resistencias para las cuales el puente formado está en equilibrio, teniéndose entonces:

$$(2) \qquad [2K(l - x) + z]\, b' = a'c'.$$

Resolviendo (1) y (2), se deducen los valores de x y z.

Para efectuar la operación se toman como líneas los dos hilos anteriormente empleados (fig. 75); los dos cursores C y C' se colocarán a una misma distancia de los extremos M y M' y las reglas unidas por sus bornes B'' y B_1'' a

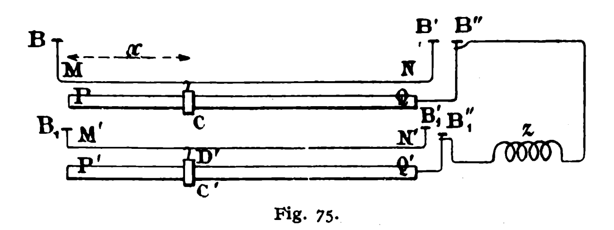


Fig. 75.

una resistencia z. Se opera como hemos dicho, teniendo en cuenta que los diámetros de los hilos son diferentes; el resultado obtenido debe comprobarse.

OBSERVACIÓN. — Aunque estos dos últimos métodos son difícilmente realizables en la práctica, hemos creído útil indicarlos como ejercicios.

CAPÍTULO IV

Medida de las resistencias de aislamiento

Se entiende por resistencia de aislamiento de una instalación el valor de la resistencia comprendida entre los conductores cuando no hay ningún receptor entre ellos, y el valor de la resistencia entre cada uno de estos conductores y la tierra.

Cuando se hace una instalación, es necesario, antes de ponerla en servicio, comprobar que su aislamiento es suficiente. Si esta instalación ha de formar parte de una red, el valor del aislamiento mínimo está dado por un reglamento oficial; en el caso de una instalación particular independiente, este valor está determinado por las condiciones generales de buen funcionamiento y de seguridad.

Como un defecto de aislamiento puede ocasionar graves accidentes en el funcionamiento y provocar incendios, y como además puede producirse un defecto o acentuarse durante la marcha al cabo de un tiempo más o menos largo, es prudente de vez en cuando proceder a la comprobación del aislamiento en toda la instalación.

El aislamiento de una dinamo es el valor de la resistencia entre los circuitos eléctricos, inducido o inductor, y la masa.

El aislamiento de un aparato cualquiera es la resistencia comprendida entre dos partes de este aparato, que deben estar separadas por un aislador.

Ohmímetros

Los ohmímetros son aparatos que dan con una simple lectura el valor de una resistencia; son fácilmente transportables y están graduados en ohms. Sus indicaciones no tienen el grado de precisión que se puede obtener por los métodos anteriores; generalmente se emplean los ohmímetros para las medidas de aislamiento. Hay varios tipos de estos aparatos, siendo los principales los siguientes:

1.º Los ohmímetros constituídos por un galvanómetro y una batería de pilas;

2.º Los ohmímetros fundados en el puente de Wheatstone, cuyo tipo es el ohmímetro Chauvin y Arnoux;

3.º Los ohmímetros constituídos por dos carretes móviles en un campo magnético, cuyo tipo es el ohmímetro Carpentier.

1.º **Ohmímetro constituído por un galvanómetro y una batería de pilas.** —El galvanómetro y la pila están encerrados en una misma caja; uno de los polos de la pila está unido a un borne del galvanómetro; el otro borne del galvanómetro y el otro polo de la pila están unidos a los dos bornes del aparato (fig. 76). La resistencia x que se mide está unida a estos dos bornes, luego la corriente en el galvanómetro es:

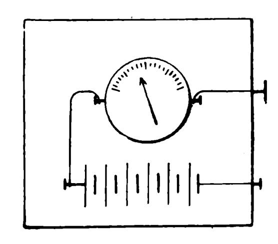
$$I = \frac{E}{r + x};$$

siendo E la fuerza electromotriz de la pila, y r su resis-

tencia interior. Como se trata de una resistencia de aislamiento muy grande, r es despreciable comparada con x, y se puede escribir:

$$I = \frac{E}{x}.$$

Si E es constante, se ve que los valores de I y por consiguiente las desviaciones de la aguja del galvanómetro son inversamente proporcionales a los valores de las resistencias medidas. Para graduar la escala, bastará cerrar el aparato sobre algunas resistencias grandes conocidas.


Fig. 76.

Es evidente que las indicaciones de este aparato sólo son exactas cuando la f. e. m. de la pila es constante.

Ahora bien, esta fuerza electromotriz puede sufrir variaciones capaces de producir errores susceptibles de llegar hasta el 50 %.

Otra causa de error proviene de la resistencia de las pilas con líquido inmóvil, generalmente empleadas, pues cuando estas pilas se gastan pueden adquirir una resistencia interior enorme. Además, con estos aparatos se somete el aislador a una débil tensión, generalmente muy inferior a la tensión normal de la instalación.

2.º **Ohmímetro de Chauvin y Arnoux.** — Está formado (fig. 77) por una caja alargada (de unos 50 centímetros de larga por 10 de ancha), la cual contiene:

A la izquierda, dos interruptores P y G; P puede estar unido a una caja de pilas por medio de un borne B; G está unido a un galvanómetro muy sensible

constituído por un cuadro suspendido entre dos muelles helicoidales en un campo magnético. Sobre este cuadro se fija una aguja de aluminio cuyo extremo se mueve en el campo de una gran lente, y un tornillo de torsión *O* permite llevar fácilmente la aguja al cero, frente a una señal de referencia; a derecha y a izquierda de esta señal se trazan dos flechas dirigidas en sentido inverso.

A la derecha, dos bornes *X*, *X'*, a los cuales se unen los extremos de la resistencia que se mide.

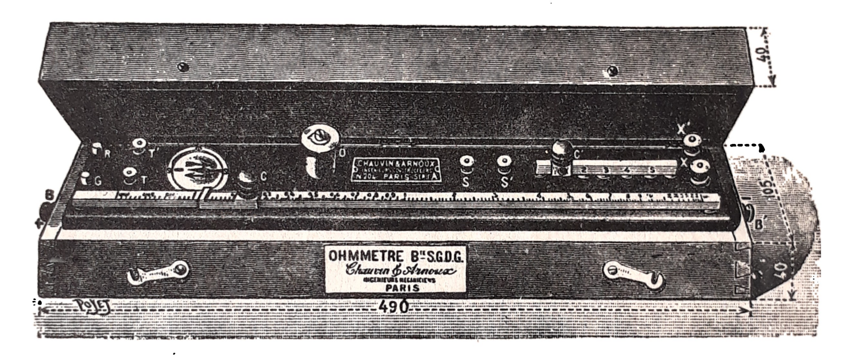


Fig. 77. — Ohmímetro de Chauvin y Arnoux.

Sobre el borde anterior hay una regla graduada, a lo largo de la cual puede deslizarse un cursor con índice *C*. Este cursor lleva un contacto que puede resbalar a lo largo de un cilindro-reostato formado por un conductor muy regularmente arrollado sobre un cilindro aislador y colocado en su sitio por medio de un tornillo apropiado; esta disposición permite disponer, sobre una pequeña longitud, 40 centímetros, de una resistencia de varios miles de ohms. El contacto se mueve a lo largo del cilindro y permite variar desde cero a infinito, de un modo continuo, la relación entre

las dos resistencias que separa y cuya suma es constante e igual a la del cilindro entero.

Sobre el borde posterior, a la derecha, hay una segunda regla sobre la cual puede deslizarse un cursor *C'*. Esta regla está colocada por encima de un cierto número de contactos o topes fijos sobre ebonita. El cursor puede apoyarse sobre estos topes, entre los cuales hay las resistencias 10, 90, 900, 9000, 90000 ohms y que están marcados con los números 1, 2, 3, 4, 5.

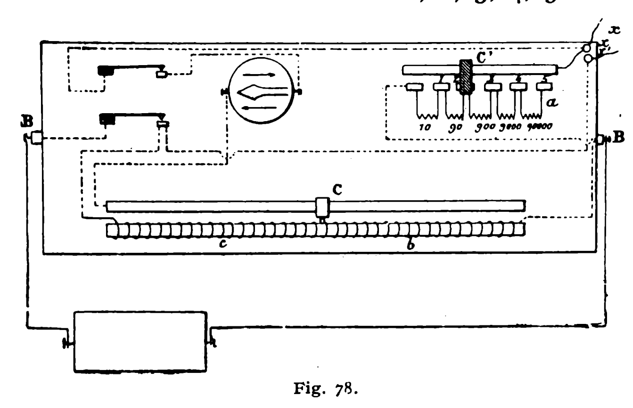


Fig. 78.

Por último, sobre los lados de la caja hay dos bornes *B*, *B'*, que se unen a los de una caja que contiene doce elementos de líquido inmóvil. Las conexiones se establecen como indica la figura 78, viéndose fácilmente que el conjunto forma un puente cuyas cuatro resistencias son: 1.ª, la resistencia de aislamiento *x*, que hay que medir; 2.ª, las resistencias comprendidas entre el cursor *C'* y el extremo de la derecha del hilo del cilindro-reostato; 3.ª, la resistencia de la parte del cilindro-reostato comprendida entre el cursor *C* y el extremo de la derecha; 4.ª, la resistencia de la parte comprendida entre *C* y el extremo de la izquierda.

Para efectuar una medida, se unen los bornes con

la resistencia medida, por ejemplo, entre los dos cables de una instalación sobre la cual no hay ningún receptor; se colocan en dos posiciones cualesquiera los cursores C y C' y se cierran las llaves P y G.

La aguja del galvanómetro se desvía hacia una de las dos flechas que hay pintadas sobre el cuadro; la dirección de esta flecha indica el sentido en que es preciso mover los cursores para obtener el equilibrio. Se mueven en sentido conveniente los cursores C y C' cuidando de que el cursor C no llegue a estar demasiado cerca de uno de los extremos de la regla.

Supongamos el equilibrio conseguido, y sean a el valor de la resistencia comprendida entre el cursor C' y el último tope de la izquierda, b y c las dos resistencias del cilindro-reostato separadas por el cursor C. Se ve que

$$x \times b = ac,$$

de donde:

$$x = a \times \frac{c}{b}.$$

La graduación de la regla da directamente la relación $\frac{c}{b}$; en cuanto al valor a, es el siguiente: supongamos que esté C' sobre el tope 2, como indica la figura 78, y en este caso el valor de a es:

$$90 + 10 = 100 = 10^2.$$

Si C' estuviera sobre el tope 4, a sería:

$$9000 + 900 + 90 + 10 = 10000 = 10^4.$$

Por consiguiente, para obtener el valor del aislamiento medido bastará multiplicar el número leído sobre la regla grande frente al cursor C por una potencia de 10 igual a la cifra escrita en el tope sobre el cual

se apoya el cursor C'. Si, por ejemplo, el cursor C está sobre la regla grande en el número 2,25 y C' está sobre el tope 5, el aislamiento medido tiene por valor:

$$2{,}25 \times 10^5 = 225\,000 \text{ ohms};$$

es decir, que se correrá la coma del número leído frente a C, cinco lugares a la derecha.

OBSERVACIÓN I. — Los resultados dados por este aparato son independientes del valor de la f. e. m. de la batería de pilas, y no están influenciados por sus variaciones. Pero la tensión a la que está sometido el aislador es muy inferior a la tensión normal.

OBSERVACIÓN II. — Se pueden medir las resistencias polarizables colocando un teléfono entre los bornes T, T' y un generador de corrientes alternas entre los bornes S, S' (fig. 77).

Ohmímetro Carpentier. — El ohmímetro Carpentier está fundado en la acción que ejerce un campo magnético sobre un cuadro móvil alrededor de un eje perpendicular a la dirección de este campo y recorrido por una corriente (fig. 79).

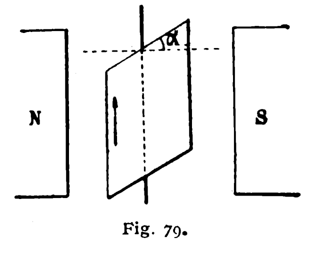


Fig. 79.

Se sabe que si este cuadro, formado de n espiras de superficie s, recorrido por una corriente i, forma con la dirección del campo de intensidad $\mathcal{H}$ un ángulo α, está sometido a un par que tiende a orientarlo perpendicularmente a la dirección del campo y cuyo valor es:

$$C = \mathcal{H} sni \cos \alpha. \qquad (*)$$

(*) Véase Tomo I: GENERALIDADES, pág. 187.

El ohmímetro Carpentier está constituído esencialmente por dos cuadros solidarios entre sí que forman un ángulo de 90°; el conjunto está montado sobre un eje vertical, que puede girar entre dos chapas de zafiro, y está en un campo magnético intenso, creado por

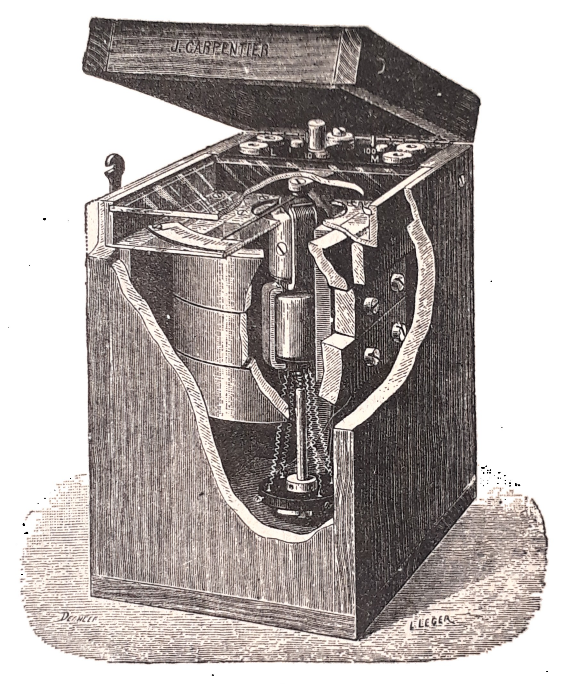


Fig. 80. — Ohmímetro Carpentier.

imanes permanentes. En el centro de cada cuadro, un cilindro fijo de hierro dulce concentra las líneas de fuerza en el entrehierro que deja libre el movimiento del sistema móvil.

Una aguja fija sobre uno de los cuadros sigue el movimiento del sistema y se mueve frente a una esfera o cuadrante graduado.

La corriente llega a cada uno de los cuadros por dos hilos de plata muy finos arrollados en hélice de modo que forman un par muy débil, es decir, que cuando no hay corriente, los cuadros no se orientan (fig. 80).

Los extremos de uno de los cuadros se unen directamente a los dos polos de un generador constituído por una magneto, y los extremos del otro cuadro están unidos a los mismos polos por medio de la resistencia medida, puesta en serie con este cuadro.

Supongamos que los dos cuadros sean idénticos, de resistencia r, con n espiras cada uno, y de superficie s. Sea x la resistencia medida y U la diferencia de potencial en los bornes de la magneto. La corriente que pasa por el primer cuadro A es:

$$i_1 = \frac{U}{r}. \tag{1}$$

La corriente que pasa por el cuadro B es:

$$i_2 = \frac{U}{r + x}. \tag{2}$$

Por efecto de estas dos corrientes, los dos cuadros están sometidos cada uno a un par que tiende a colocarlos perpendicularmente a la dirección del campo, y como están montados a 90° entre sí, los efectos de estos pares son opuestos y el sistema toma una posición de equilibrio determinada por la condición de que el par resultante sea nulo, es decir, por la condición de que los dos pares que se ejercen sobre cada uno de los cuadros sean iguales (figs. 81 a 83).

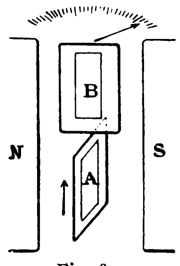


Fig. 81.

Sea α el ángulo que forma en estas condiciones el cuadro superior B con el campo magnético $\mathcal{H}$ del

imán; según lo que hemos dicho, el par que se ejerce sobre él es:

$$C_2 = \mathcal{H} sni_2 \cos \alpha,$$

siendo $\mathcal{H}$ la intensidad del campo.

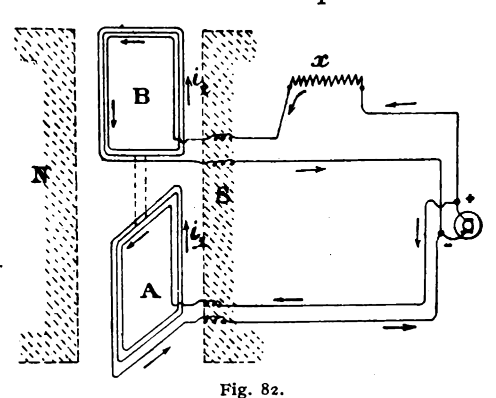


Fig. 82.

El cuadro A forma evidentemente con el campo el ángulo $90^\circ - \alpha$, y el par que se ejerce sobre él es:

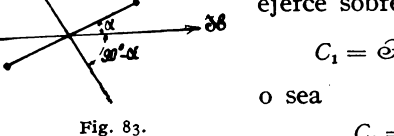


Fig. 83.

$$C_1 = \mathcal{H} sni_1 \cos (90 - \alpha)$$

o sea

$$C_1 = \mathcal{H} sni_1 \operatorname{sen} \alpha.$$

Una vez realizado el equilibrio del sistema, se tiene:

$$\mathcal{H} sni_2 \cos \alpha = \mathcal{H} sni_1 \operatorname{sen} \alpha$$

o sea

$$i_2 \cos \alpha = i_1 \operatorname{sen} \alpha,$$

de donde

$$\frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} = \frac{i_2}{i_1},$$

es decir,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{i_2}{i_1};$$

y sustituyendo en esta expresión los valores hallados en (1) y (2), se tiene:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\frac{U}{r+x}}{\frac{U}{r}} \quad \text{o sea} \quad \operatorname{tg}\alpha = \frac{r}{r+x}.$$

Es evidente que si $x = 0$,

$$\operatorname{tg}\alpha = 1, \qquad \alpha = 45^{\circ}.$$

Por consiguiente, cuando la resistencia medida es cero, los dos cuadros se orientan de modo que forman un ángulo de 45° con la dirección del campo.

Si x es infinito, tg α es cero y $\alpha = 0$, es decir, que el cuadro superior es paralelo a la dirección del campo $\mathcal{H}$.

De todo lo expuesto se infiere que cuando la resistencia x toma valores que varían entre cero e infinito, la aguja se mueve entre la posición para la cual el cuadro superior B está inclinado 45° sobre el campo y aquella para la cual dicho cuadro es paralelo a este campo. El cuadrante ante el cual se mueve la aguja tiene una extensión angular sólo de 45° (fig. 84). Por medio de grandes resistencias conocidas se puede por comparación graduar en ohms este cuadrante.

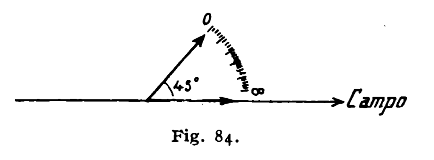


Fig. 84.

En realidad, en el aparato construído por Carpentier los dos cuadros no son idénticos; el cuadro inferior A está formado por un hilo grueso y un pequeño número n_1 de espiras (fig. 85), mientras que el cuadro superior B está formado por un gran número n_2 de espiras de hilo fino. En serie con el cuadro de hilo fino hay una gran resistencia R, de tal valor, que cuando

la resistencia medida es nula, la corriente es aproximadamente la misma en los dos cuadros, pero el par $\mathcal{H} sn_1 i_1$ que actúa sobre el cuadro inferior *A* es muy pequeño comparado con el par $\mathcal{H} sn_2 i_2$ que se ejerce sobre el cuadro superior *B*, por ser n_2 mucho más grande que n_1, y el cuadro *B* se coloca perpendicularmente a la dirección del campo. Cuando la resistencia *x* es infinita no pasa ninguna corriente por el cuadro superior y el cuadro inferior se orienta perpendicularmente a la dirección del campo, quedando por consiguiente *B* paralelo a este campo. Se ve, pues, que el cuadro superior varía desde la posición perpendicular a la posición paralela al campo, es decir, de 90°, cuando la resistencia medida varía de cero a infinito, y se tiene por consiguiente una mayor amplitud en el movimiento de la aguja.

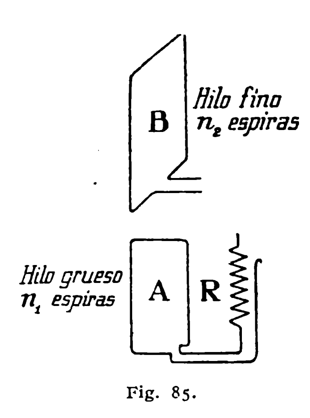


Fig. 85.

Dispositivo para hacer variar la sensibilidad del aparato. — Según acabamos de ver, si la resistencia que se mide es muy grande, la desviación de la aguja es muy pequeña, y por lo tanto, pueden cometerse errores considerables. Para salvar este inconveniente se disponen en el interior de la caja resistencias que shuntan el cuadro superior, como indica el esquema de la figura 86.

Se ve que si se coloca la manivela sobre el tope 100, el cuadro *B* queda shuntado por una resistencia r_1; por consiguiente, para una misma resistencia *x*, la corriente en el cuadro *B* es menor que si este cuadro no estuviera shuntado, y la desviación será más grande. La resis-

tencia r_1 está determinada de modo que esta desviación sea 100 veces mayor que sin shunt, es decir, que el valor de la resistencia se obtendrá multiplicando por 100 el número leído frente a la aguja. La resistencia r_2, correspondiente al tope 10, es mayor que la correspondiente al tope 100, y la resistencia se obtendrá multiplicando el número leído por 10. Por último, cuando

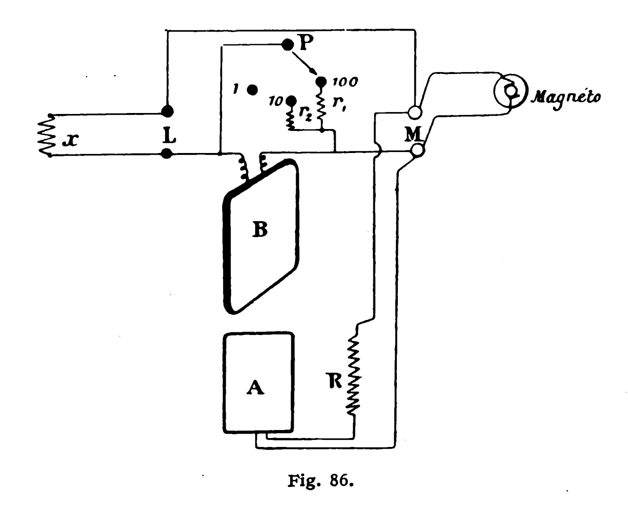


Fig. 86.

la manivela está sobre el tope 1, el cuadro *B* no está shuntado y la lectura da directamente el valor de la resistencia medida.

Generador. — La corriente está producida por una pequeña magneto de corriente continua movida a mano. No hay necesidad de determinar su velocidad, puesto que el valor de la fuerza electromotriz no interviene ni influye en la medición. De este modo puede obtenerse una tensión del mismo orden de magnitud que aquella a que está sometida de ordinario la instalación de que se trata.

Medida del aislamiento de una instalación

Instalación particular derivada de una red general. — El aparato que se usa es un ohmímetro. Sea una instalación particular de alumbrado, representada esquemáticamente en la figura 87.

Para estudiar el aislamiento de la instalación, se empieza por ver si los fusibles de los cortacircui-

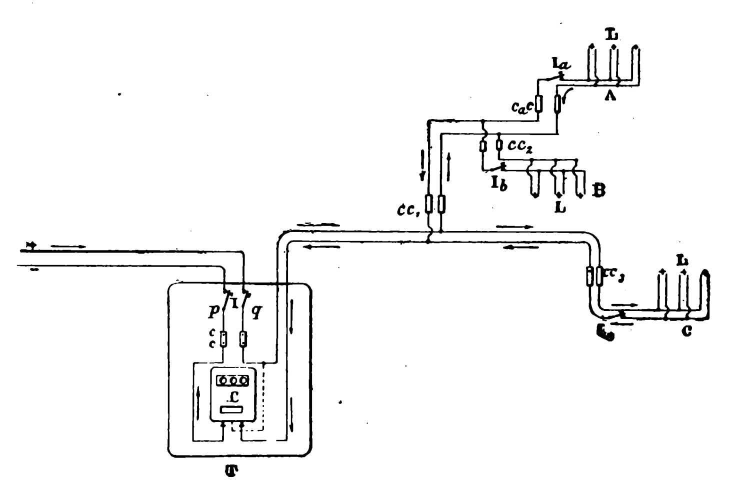


Fig. 87.

tos *cc*... están bien colocados, y se cierran los interruptores I_a, I_b, I_c de las habitaciones *A*, *B*, *C*, de donde se han quitado todas las lámparas.

Estando abierto el interruptor general *I*, se unen los dos extremos *p* y *q* a los dos bornes del ohmímetro (*X*, *X'* del ohmímetro de Chauvin y Arnoux; *L* del ohmímetro de Carpentier).

Si se encuentra un aislamiento defectuoso, se puede buscar si está en alguna de las habitaciones *A*, *B* ó *C*.

Para ello se quitan los fusibles cc_3, por ejemplo, y se repite la medición; si el aislamiento es aún defectuoso, se quitan sucesivamente los fusibles cc_a y cc_2. Si cuando se quitan los fusibles cc_3, por ejemplo, el aislamiento indicado es conveniente, quiere decir que el defecto está en la habitación *B*. Se comprende que procediendo de esta manera se puede encontrar la habitación en que está el punto defectuoso.

Si no estuviera en ninguna de las habitaciones, se mide el aislamiento entre cc_1 y cc_a, cc_1 y cc_2, etc., y se llegará fácilmente a localizar el defecto, es decir, a descubrir la parte de la línea en que se encuentra.

El valor mínimo del aislamiento de una instalación de esta clase está determinado en general por un reglamento municipal; ordinariamente depende este valor del número de lámparas de la instalación, siendo evidentemente tanto menor cuanto mayor es el número de las mismas.

Los valores impuestos por la Asociación suiza de electricistas son los siguientes:

1.º Entre la tierra y cada cable, siendo n el número de lámparas:

$$10^4 + \frac{10^6}{n} \text{ ohms}$$

y

$$2 \times 10^4 + \frac{3 \times 10^6}{n} \text{ para una tensión superior a 250 volts;}$$

2.º Entre los dos conductores:

$$2 \times 10^4 + \frac{2 \times 10^6}{n} \text{ ohms}$$

y

$$2 \times 10^4 + \frac{6 \times 10^6}{n} \text{ para una tensión superior a 250 volts.}$$

El sector de Clichy exige:

$$\frac{8 \times 10^6}{n} \text{ ohms.}$$

Por consiguiente será: para una lámpara, 8 megohms; para 10 lámparas, 800 000 ohms; para 50 lámparas, 160 000; para 100 lámparas, 80 000 ohms; etc.

Un motor o una lámpara de arco se cuenta como 10 lámparas.

Instalación de una red de estación central. — El sistema de distribución empleado es la distribución

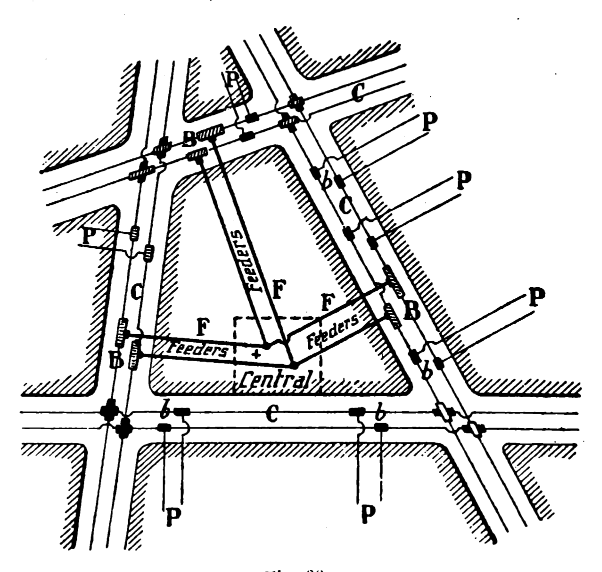


Fig. 88.

por *feeders* (1) (fig. 88). La región alimentada por la

(1) La palabra inglesa *feeder* significa en castellano *alimentador*, llamándose también a la distribución por *feeders*, distribución por *cables alimentadores*.

fábrica está surcada por un sistema de cables distribuidores *C*, *C*... sobre los cuales se toman mediante cajas de derivación *b*, *b*... las ramificaciones *P*, *P*... que terminan en las instalaciones particulares. El sistema de cables *C* forma una red de conductores que comunican entre sí por muchos puntos. Estos cables están unidos a los polos de las máquinas generadoras de la fábrica por cables gruesos llamados *feeders*. Los feeders están unidos a los cables distribuídos en algunos puntos llamados *centros de distribución*, por medio de cajas de empalme *B*, *B*... Sucede con mucha frecuencia tener que medir el aislamiento de algunos trozos de estos cables; se mide evidentemente entre dos cajas de empalme o de derivación.

Para efectuar esta medida se sigue generalmente el método de la desviación.

Si se descubre la existencia de un defecto de aislamiento en un trozo, se localiza empleando el método del lazo (pág. 46).

Método de la desviación. — El principio o fundamento del método es el siguiente:

Sea *R* la resistencia de aislamiento que hay que medir. Se pone en serie con un galvanómetro muy sensible; se unen los dos extremos del circuito así formado con los dos polos de una pila de fuerza electromotriz elevada *E* y se shunta el galvanómetro con una resistencia *s* tal, que la desviación resultante tenga un valor conveniente (fig. 89).

G
S
R

Fig. 89.

Sea *g* la resistencia del galvanómetro; calculemos la corriente *i* que lo atraviesa y que produce la desviación α leída sobre la regla.

La pila está cerrada sobre un circuito que com-

prende la resistencia R, y en serie con esta resistencia, el grupo de las dos resistencias en derivación g y s, cuyo valor es $\frac{gs}{g+s}$.

La resistencia total del circuito es, por consiguiente:

$$\rho + R + \frac{gs}{g+s},$$

siendo ρ la resistencia interior de las pilas. La corriente producida por la pila es:

$$I = \frac{E}{\rho + R + \frac{gs}{g+s}}.$$

La corriente en el galvanómetro tiene por valor:

$$i = \frac{E}{\rho + R + \frac{gs}{g+s}} \times \frac{s}{g+s},$$

y como la desviación α es proporcional a esta corriente, se tiene la relación:

(1) $$\frac{E}{\rho + R + \frac{gs}{g+s}} \times \frac{s}{g+s} = K\alpha.$$

Se hace después otra medición, poniendo en serie con el galvanómetro una resistencia elevada conocida, R'; entonces hay que emplear otro shunt s' para tener una desviación conveniente. Cuando se cierra el interruptor, se lee una cierta desviación α', y se tiene como en el caso anterior:

(2) $$\frac{E}{\rho + R' + \frac{gs'}{g+s'}} \times \frac{s'}{g+s'} = K\alpha'.$$

Dividiendo ordenadamente las igualdades (1) y (2), se tiene:

$$\frac{\dfrac{E}{\rho + R + \dfrac{gs}{g+s}} \times \dfrac{s}{g+s}}{\dfrac{E}{\rho + R' + \dfrac{gs'}{g+s'}} \times \dfrac{s'}{g+s'}} = \frac{\alpha}{\alpha'}$$

o sea:

$$\frac{\left(\rho + R' + \dfrac{gs'}{g+s'}\right)(g+s')s}{\left(\rho + R + \dfrac{gs}{g+s}\right)(g+s)s'} = \frac{\alpha}{\alpha}$$

de donde puede deducirse el valor de R.

Ahora bien, este valor de R es muy elevado, del orden del megohm; R' también es muy grande, del orden de 100 000 ohms, luego en comparación con estos valores resultan despreciables ρ, $\frac{gs}{g+s}$ y $\frac{gs'}{g+s'}$, pues $\frac{s}{g+s}$ es menor que 1, y g está comprendido entre 200 y 400 ohms; por consiguiente, se puede escribir:

$$\frac{R'(g+s')s}{R\,(g+s)s'} = \frac{\alpha}{\alpha'}$$

de donde:

$$R = R' \frac{g+s'}{g+s} \times \frac{s}{s'} \times \frac{\alpha'}{\alpha}$$

o bien:

$$R = R' \frac{\dfrac{g+s'}{s'}}{\dfrac{g+s}{s}} \times \frac{\alpha'}{\alpha}.$$

Observación I. — Se emplean generalmente shunts especiales construídos para el galvanómetro que se utiliza y se tiene en vez del valor en ohms de estos shunts, sus poderes multiplicadores cuyo valor es $\frac{g+s}{s}$. Por consiguiente, si en la primera medición se ha empleado un shunt de poder multiplicador m y en la segunda un shunt de poder multiplicador m', se tiene:

$$m = \frac{g+s}{s}, \qquad m' = \frac{g+s'}{s'},$$

y por lo tanto:

$$R = R' \frac{m' \alpha'}{m\alpha} \cdot$$

Observación II. — Cuando hay que hacer con un mismo aparato una serie de mediciones de aislamiento del mismo orden de magnitud, se emplean los mismos shunts y la misma resistencia de comparación R', de modo que el valor $R' \frac{m' \alpha'}{m}$ será el mismo para todas las mediciones; luego representándolo por A, se tendrá:

$$R = \frac{A}{\alpha};$$

es decir, que la resistencia de aislamiento se obtendrá dividiendo por la desviación resultante la constante A.

Este método es el que se emplea generalmente para la medida de los aislamientos de instalaciones con cables subterráneos. Los aparatos necesarios para su aplicación, que son cajas de resistencias, pilas, galvanómetro, van contenidos en una caja que puede transportar un hombre. Las medidas pueden hacerse en el interior de los edificios, en las calles y en los caminos o carreteras.

Caso en que hay que hacer la medición estando cargada la instalación. — Empleo de un voltímetro. — Por medio de un voltímetro de resistencia conocida r, se puede medir el aislamiento entre cada uno de los conductores y la tierra. Sean X e Y los dos conducto-

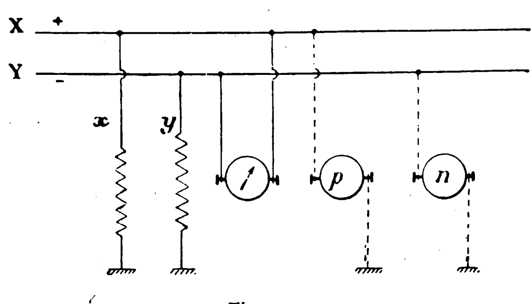


Fig. 90.

res unidos a los dos polos del generador. Designemos por x la resistencia de aislamiento entre X y la tierra; por y, la resistencia de aislamiento entre Y y la tierra.

El voltímetro se coloca (fig. 90):

1.º Entre los dos polos de la instalación, por ejemplo, entre las dos barras o los dos bornes del cuadro de donde salen los cables; sea e la indicación que da;

2.º Entre el polo + y la tierra; sea p su indicación;

3.º Entre el polo — y la tierra; sea n su indicación.

Conociendo r, e, p y n se pueden determinar los valores de x y de y.

En efecto, consideremos el voltímetro colocado entre el cable + X y la tierra. Se ve que el polo + está unido al polo — por la resistencia r del voltímetro

y la resistencia de aislamiento x, unidas en paralelo, y por la resistencia de aislamiento y en serie con x y r (fig. 91).

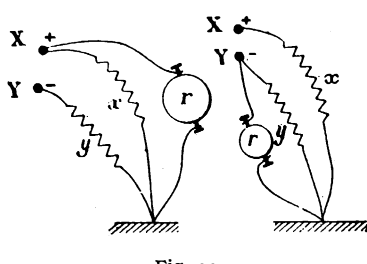


Fig. 91.

Sabemos que el sistema formado por las dos resistencias x y r tiene un valor igual a $\frac{x \times r}{x + r}$ y por consiguiente, la d. d. p. e está aplicada en los extremos de la resistencia $\frac{x \times r}{x + r} + y$.

La corriente total que pasa por y es:

$$I = \frac{e}{\frac{xr}{x + r} + y}, \qquad I = \frac{e(x + r)}{r(x + y) + xy}$$

y la corriente en el voltímetro:

$$i = I \times \frac{x}{x + r}$$

o sea:

$$i = \frac{e(x + r)}{r(x + y) + xy} \times \frac{x}{x + r}$$

$$i = \frac{ex}{r(x + y) + xy}.$$

Ahora bien, este voltímetro de resistencia r, recorrido por la corriente i, indica p volts; luego:

$$p = ri$$

o sea:

(1) $$p = \frac{erx}{r(x + y) + xy}$$

Cuando se aplica el voltímetro entre el polo — y la tierra, la indicación de este aparato es n; y análogamente a como acabamos de razonar, tendremos:

$$(2) \qquad n = \frac{ery}{r(x+y)+xy}.$$

Resolviendo las ecuaciones (1) y (2) en x e y, se tiene:

$$x = r\frac{e-(p+n)}{n}$$

$$y = r\frac{e-(p+n)}{p}.$$

Estos valores son los del aislamiento entre cada conductor y la tierra.

Indicador de tierra. — Puede producirse una tierra por una resistencia tan grande que no ocasione trastorno ninguno en el funcionamiento de la instalación. Es necesario apercibirse de esta tierra para poderla arreglar antes que alcance un valor demasiado grande: para ello se dispone en las centrales un aparato llamado *indicador de tierra* que señala este defecto en cuanto se produce. Un indicador de tierra está constituído por dos lámparas L, L' montadas en serie entre los dos cables X, X'; estas dos lámparas, tan iguales como sea posible, tienen separadamente su intensidad luminosa normal cuando funcionan bajo la tensión que existe entre los cables, de modo que montadas en serie bajo la misma tensión dan una iluminación muy débil. Ambas lámparas están unidas a tierra del modo representado en la figura 92, de manera que

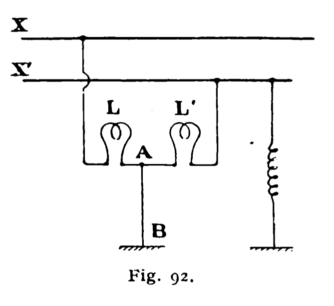


Fig. 92.

si se produce una tierra sobre el cable *X'*, por ejemplo, la lámpara *L'* se encuentra shuntada por la resistencia de esta tierra, y por la lámpara *L* pasa una corriente mayor, aumentando su luz, mientras que la de *L'* disminuye.

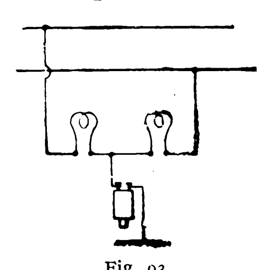


Fig. 93.

Por el contrario, si se produce la tierra sobre el cable *X*, disminuye la luz de la lámpara *L* y aumenta la de *L'*.

Es evidente que la diferencia de brillo entre las lámparas será tanto mayor cuanto menor sea la resistencia de la tierra; si uno de los cables toca directamente con la tierra, una de las lámparas se apaga, mientras que la otra brilla con su intensidad normal.

Puede colocarse en el conductor *AB* que une las lámparas a tierra un timbre que avisa el momento en que se produce la tierra (figura 93).

Algunas veces se intercala entre cada cable y la tierra un voltímetro; la desviación de la aguja es evidentemente tanto más grande cuanto más importante es la tierra (fig. 94).

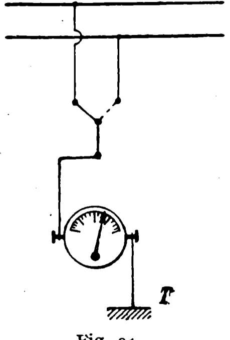


Fig. 94.

Medida de la resistencia de aislamiento de un aislador

Los resultados de la medición de un aislador varían considerablemente con la temperatura del aislador y con el tiempo que se mantiene aplicada la tensión.

Es preciso, por consiguiente, indicar a la vez que el resultado, el método empleado y las condiciones en que se ha operado.

Si el aislamiento medido es el de un cable, se deduce la resistencia de aislamiento por metro, siendo esta resistencia inversamente proporcional a la longitud del cable. Si se ha medido la resistencia de aislamiento de una sustancia en forma de tela, placa, papel, se deducirá la resistencia por centímetro cuadrado, siendo esta resistencia inversamente proporcional a la superficie del aislador.

Los métodos empleados para estas mediciones son el *método de la desviación*, ya descrito, y el *método de la pérdida de carga*.

Método de la pérdida de carga. — Este método está fundado en la observación de la descarga de un condensador, cargado de antemano, a través del aislador durante un tiempo dado. Un condensador cargado cerrado sobre un aislador pierde al cabo de un cierto tiempo una parte de su carga, y conociendo esta pérdida se puede deducir el valor de la resistencia del aislamiento sometido a la medición.

Sea C farads la capacidad de un condensador; si se carga empleando un generador de fuerza electromotriz E volts, adquiere una carga $q = CE$ coulombs. Descargando esta carga q en el galvanómetro balístico, produce una elongación θ_1, proporcional a q; por consiguiente,

(1) $$CE = K\theta_1$$

siendo K la constante del balístico (pág. 22).

Se carga otra vez el condensador con la misma fuerza electromotriz E, y tomará la cara $q = CE$ coulombs; después se cierra sobre la resistencia de

aislamiento que se quiere medir, anotando el preciso momento en que empieza la descarga. En este momento la corriente tiene por valor:

$$I_1 = \frac{E}{x}$$

siendo x la resistencia medida.

Al cabo de t segundos de descarga, la diferencia de potencial entre las armaduras del condensador sería E', menor que E, e interrumpiendo la descarga en este momento, se tiene:

$$I_2 = \frac{E'}{x}.$$

Se admite que durante los t segundos de descarga, la corriente conserva un valor constante igual a la media aritmética de sus valores al principio y al fin de la descarga, es decir:

$$I = \frac{I_1 + I_2}{2} = \frac{E + E'}{2x}$$

Por consiguiente, la cantidad de electricidad que ha atravesado el aislador, o sea la pérdida de carga del condensador, es:

$$q' = \frac{E + E'}{2x} t,$$

y en el condensador queda una carga:

$$q - q' = CE - \frac{E + E'}{2x} t.$$

Además, siendo la diferencia de potencial después de la descarga E', la carga que queda en el condensador tiene por valor CE'.

Descargando de nuevo el condensador en el balístico se produce una elongación θ_2 tal, que:

$$(2) \qquad CE - \frac{E + E'}{2x} t = K\theta_2$$

o sea:

$$(3) \qquad CE' = K\theta_2.$$

De las igualdades (1) y (3) se deducen los valores de E y E':

$$E = \frac{K\theta_1}{C} \quad \text{y} \quad E' = \frac{K\theta_2}{C},$$

que sustituídos en la igualdad (2), dan:

$$K\theta_1 - \frac{K\theta_1 + K\theta_2}{2Cx} t = K\theta_2$$

de donde:

$$2Cx(\theta_1 - \theta_2) = (\theta_1 + \theta_2)t$$

$$x = \frac{t}{C} \frac{\theta_1 + \theta_2}{2(\theta_1 - \theta_2)}.$$

Este valor de x no es rigurosamente exacto, porque hemos admitido que la corriente de descarga permanecía constante, no siendo esto cierto, pues decrece progresivamente desde $I_1 = \frac{E}{x}$ hasta $I_2 = \frac{E'}{x}$.

El valor exacto de x, determinado por procedimientos de cálculo que no podemos dar aquí, es:

$$x = 0{,}4343 \frac{t}{C \log \frac{\theta_1}{\theta_2}}.$$

Si C está expresado en microfarads, x estará

expresado en megohms; en efecto, el valor de C en farads es $\frac{C}{10^6}$, y x tendrá por valor:

$$x = 0{,}4343 \frac{t}{\frac{C}{10^6} \log \frac{\theta_1}{\theta_2}} \text{ ohms} = \frac{0{,}4343 \times t}{C \log \frac{\theta_1}{\theta_2}} \times 10^6 \text{ ohms},$$

o sea:

$$\frac{0{,}4343\ t}{C \log \frac{\theta_1}{\theta_2}} \text{ megohms.}$$

Montaje. — Para efectuar esta medición se hace el montaje del modo indicado en la figura 95. Colocando

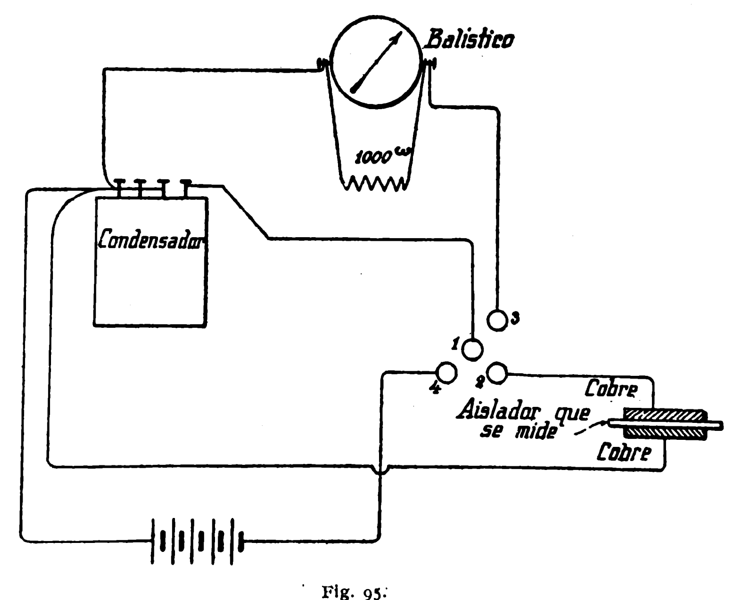


Fig. 95.

la horquilla en los agujeros 1-4 se carga el condensador, y poniéndola después en la posición 1 - 3 el

condensador se descarga en el balístico y se lee la elongación θ_1. Se vuelve a cargar el condensador 1 - 4; se coloca la horquilla en la posición 1 - 2 y al mismo tiempo se pone en marcha el cronómetro; al cabo de treinta segundos, por ejemplo, se retira la horquilla y se coloca en la posición 1 - 3, con lo cual se hace pasar la carga restante por el balístico y se lee la elongación θ_2.

Aplicando la fórmula anterior se deduce el valor de x.

Diferentes aisladores. — Cuando el aislador se presenta en forma de placa u hoja: mica, fibra, cartón, etc., se corta una cierta superficie del mismo de forma rectangular y se coloca entre dos placas de cobre de dimensiones rigurosamente determinadas, cuyas superficies son iguales a la de la parte del aislador sometido a la medición.

Aislamiento de un cable. — Es el valor del aislamiento comprendido entre el ánima del cable y la armadura exterior; se toma una longitud determinada del cable, que se sumerge en agua a 24°; se aísla uno de sus extremos y se mide el aislamiento entre el ánima desnuda por el otro extremo y el agua (fig. 96).

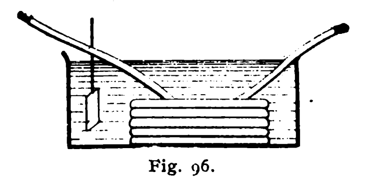


Fig. 96.

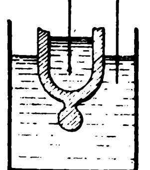


Fig. 97.

Aislamiento de un aislador de campana. — Se coloca la campana invertida en agua salada llenando su interior de agua salada, y se mide el aislamiento entre el agua interior y la exterior (fig. 97).

Prueba de los aisladores a la ruptura. — Frecuentemente no se mide el valor del aislador, sino que se le somete a una tensión igual por lo menos al doble de la tensión ordinaria que ha de soportar, generalmente por medio de un transformador.

Por ejemplo, para ensayar un aislador ordinario a la ruptura se puede proceder de la manera siguiente: se coloca el aislador en una cuba metálica de manera que quede el hierro hacia arriba; se pone agua en la cuba hasta llegar a la mitad de la campana aproximadamente. La cuba se une a uno de los bornes del secundario de un transformador cuyo otro borne está unido al hierro del aislador; se eleva progresivamente la tensión en los bornes del secundario hasta llegar al doble de la tensión usual y se mantiene esta tensión durante media hora. Si el aislador es defectuoso, se empieza por notar un olor característico de ozono, oyéndose un sonido cuya intensidad va aumentando, hasta que un golpe seco indica que el aislador se ha roto.

A esta prueba se someten también las espiras de los alternadores en construcción y los devanados primario y secundario de los transformadores. El secundario del transformador empleado para los ensayos está unido en estos experimentos a la masa y a cada uno de los devanados.

También se someten a veces a estas pruebas los devanados de las dinamos de corriente continua.

Aislamiento de una dinamo. — Para medir el aislamiento de una dinamo, es decir, el aislamiento entre los circuitos inductor e inducido y la masa, o también el aislamiento entre las láminas del colector, el procedimiento más sencillo y más rápido consiste en emplear un ohmímetro. Si se dispone de una tensión conve-

niente se puede medir este aislamiento por medio de un voltímetro de resistencia conocida, del modo siguiente:

Para medir, por ejemplo, el aislamiento del inducido, se separa el circuito inductor de las escobillas, se une uno de los polos del generador con el voltímetro, que está unido por su otro borne con una de las escobillas, y el otro polo del generador se une directamente a la masa de la máquina (fig. 98).

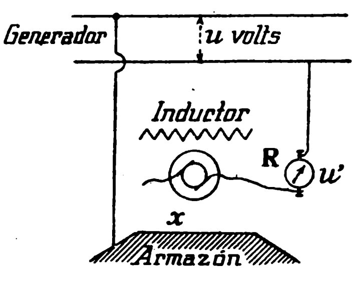


Fig. 98.

Sean: u la diferencia de potencial entre los polos del generador, R la resistencia del voltímetro y x la resistencia de aislamiento. Lo corriente en el voltímetro es:

$$i = \frac{u}{R + x},$$

y la diferencia de potencial aplicada a sus bornes es Ri, o sea:

$$R\frac{u}{R + x}.$$

Por consiguiente, si u' es la indicación del voltímetro, se tiene:

$$u' = R\frac{u}{R + x}, \quad \text{o sea} \quad Ru' + u'x = Ru,$$

de donde:

$$x = \frac{R(u - u')}{u'} = R\left(\frac{u}{u'} - 1\right).$$

Del mismo modo se opera para el circuito inductor.

EJERCICIOS

1.° Medida del aislamiento de la instalación de luz en una habitación

Se quitan los fusibles de los cortacircuitos que están dispuestos a la entrada de la habitación; se quitan todas las lámparas y se une el ohmímetro a los dos bornes del

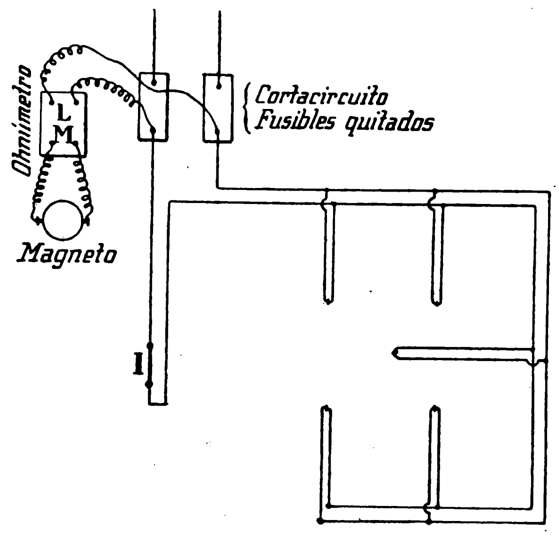


Fig. 99.

cortacircuito a que están unidos los conductores que alimentan las lámparas de la habitación (fig. 99).

Poner una lámpara, medir su resistencia con el ohmímetro, comprobar la influencia de las resistencias de los shunts colocando la manivela sucesivamente en los contactos 1, 10, 100. Medir otra vez la resistencia con dos, tres lámparas.

Medir a continuación el aislamiento entre cada uno de los conductores y la tierra; se toma como tierra una tubería de agua (mejor que de gas), que se limpia en uno de sus puntos con el cual se une uno de los bornes L del ohmímetro Carpentier, o uno de los bornes X, X' del ohmímetro Chauvin y Arnoux (fig. 100).

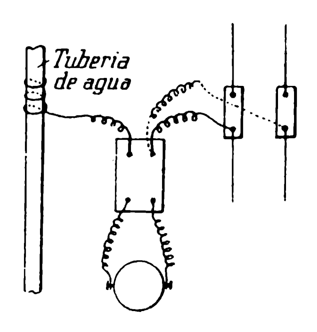


Fig. 100.

Comprobar que se realizan las condiciones dadas en el capítulo anterior.

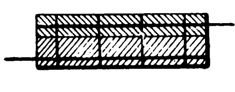
2.º Medir la resistencia de un aislante

a) *Método de la desviación*

Para medir la resistencia de un pequeño aislamiento, disponiendo únicamente de un galvanómetro ordinario Deprez y Arsonval, se toma, por ejemplo, un papel humedecido, que se coloca entre dos piezas de cobre perfectamente planas, cuyas superficies de contacto con el papel, iguales, se han medido exactamente. De la misma manera se opera con un trozo de mármol, de pizarra, etc.

b) *Método de la pérdida de carga*

Medir los aislamientos de un papel, de un cartón, de un aislador. Medir la resistencia de aislamiento entre dos conductores; los dos hilos se unen fuertemente entre sí y se mide la resistencia en las ánimas de ambos (fig. 101).


Fig. 101.

Comprobar que el valor resultante varía considerablemente con la tensión empleada, con el valor tomado para la capacidad del condensador y con la duración de la descarga. Se puede tomar como generador una pila de varios elementos de pequeñas dimensiones, formado cada uno de una placa de carbón y de una placa de

zinc, que se puede introducir en un vaso de vidrio que contiene una solución de sal amoníaco (figura 102). Como estas pilas sólo producen una pequeña corriente durante un tiempo muy corto, no hay peligro de polarización. También puede formarse una batería mediante horquillas cobre zinc sumergidas en vasos que contienen agua (fig. 103).

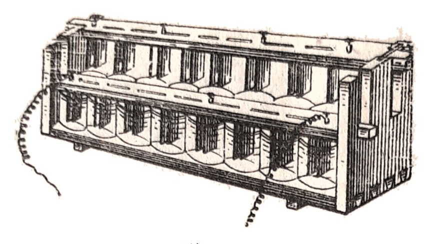


Fig. 102.

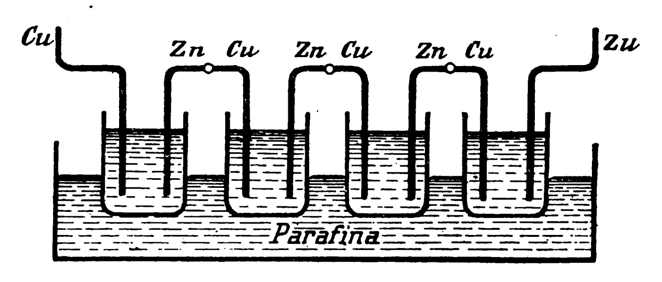


Fig. 103.

3.º Medir la resistencia de aislamiento de una dinamo, primero con el ohmímetro, después con un voltímetro, y comparar los resultados.

CAPÍTULO V

I. — Medida de una resistencia por medio de un voltímetro y de un amperímetro

a) **Resistencia de mediano valor.** — Se hace pasar por la resistencia x que se mide, una corriente I cuyo valor está dado por un amperímetro; un voltímetro derivado entre los extremos de esta resistencia da el valor de la diferencia de potencial (fig. 104):

$$u = xI, \quad \text{de donde} \quad x = \frac{u}{I}.$$

Este procedimiento no es muy exacto: 1.º por los errores posibles en las indicaciones del voltímetro y del amperímetro, pues estos aparatos están sujetos a desarreglos; 2.º por estar atravesado el voltímetro por una corriente i, muy pequeña por cierto, por ser muy resistente el circuito que lo constituye; de aquí resulta que si el amperímetro indica I, la corriente en la resistencia es $I - i$ y el voltímetro da x $(I - i)$, de modo que en realidad se tiene:

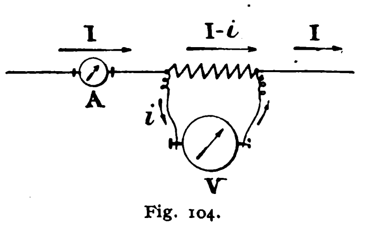


Fig. 104.

$$u = x(I - i), \quad \text{de donde} \quad x = \frac{u}{I - i}.$$

Este último error es tan pequeño que puede despreciarse en la mayor parte de los casos en que se aplica este método. Se puede anular empleando un voltímetro electrostático, que no es recorrido por corriente alguna (pág. 120).

Se pueden evitar los inconvenientes que resultan de la falta de exactitud en las indicaciones del amperímetro y del voltímetro, del modo siguiente:

Se dispone en serie con la resistencia medida x, una resistencia conocida R del mismo orden de magnitud que x; se hace pasar por el circuito así formado una corriente de intensidad bastante grande, sobre todo si la resistencia es pequeña, y se intercala en el circuito un amperímetro que da el valor I de esta corriente (fig. 105).

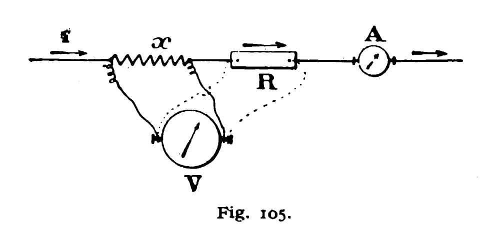


Fig. 105.

Se deriva un voltímetro entre los extremos de la resistencia x, y sea u su indicación:

$$(1) \qquad u = xI.$$

Se deriva a continuación el mismo voltímetro entre los bornes de la resistencia conocida R, y sea u' su indicación:

$$(2) \qquad u' = RI.$$

En el amperímetro se ve que la corriente no ha cambiado durante estas dos lecturas. Dividiendo ordenadamente las igualdades (1) y (2), se tiene:

$$\frac{u}{u'} = \frac{x}{R}, \qquad \text{de donde} \qquad x = R\frac{u}{u'}.$$

Por consiguiente, quedan eliminados los errores que

pudieran provenir del amperímetro; en cuanto al voltímetro, basta que dé indicaciones proporcionales a la diferencia de potencial que se le aplica.

b) **Resistencia pequeña.** — Si la resistencia x es pequeña, y por consiguiente también lo es la resistencia de comparación R, las diferencias de potencial entre los extremos de estas resistencias son también muy pequeñas, por lo cual el voltímetro debe ser muy sensible.

Para esta medición se emplea un galvanómetro y se toma una resistencia en serie y un shunt conve-

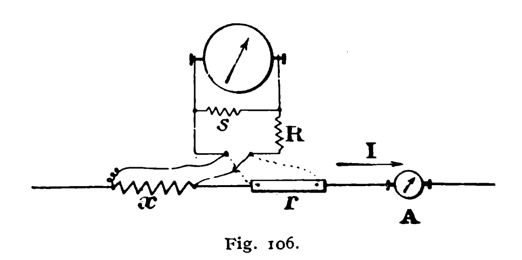


Fig. 106.

nientes (fig. 106); sean α y α' las desviaciones obtenidas uniendo los bornes del galvanómetro, montado de este modo, con los extremos de x y de R respectivamente. Se tiene:

$$\frac{xI}{R+\frac{gs}{g+s}} \times \frac{s}{g+s} = K\alpha,$$

$$\frac{RI}{R+\frac{gs}{g+s}} \times \frac{s}{g+s} = K\alpha',$$

de donde:

$$\frac{x}{R} = \frac{\alpha}{\alpha'}, \qquad x = R\frac{\alpha}{\alpha'}.$$

Aplicación a la localización de averías en un cable. — Sea un cable *AB* (fig. 107) puesto a tierra en un punto *T* y en la proximidad del cual se encuentra otro cable sin averías *CD*.

Para encontrar la distancia *x* de la avería a la extremidad *A* se opera de la manera siguiente: las dos extremidades *B* y *D* se unen por un conductor de sección tal que su resistencia sea despreciable con relación a la de los cables y se deriva entre las extremidades *A* y *C* una batería de acumuladores susceptible

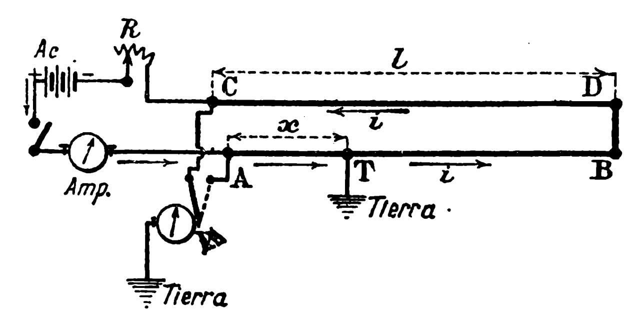


Fig. 107.

de proporcionar una corriente de 10 a 20 amperes: un reostato permite llevar esta corriente a un valor conveniente y un amperímetro el verificarlo. Entre la tierra y cada una de las extremidades *A* y *C* se puede derivar alternativamente, por medio de un conmutador, un voltímetro *V* susceptible de medir, con una aproximación suficiente, tensiones del orden de décimas de volt.

Sea l metros de longitud, siempre conocida, de cada uno de los dos cables y ρ su resistencia métrica. Si i es la corriente que pasa por los cables, la tensión entre *A* y *T*, dada por el voltímetro, será:

$$u = \rho x i,$$

y la tensión dada por el voltímetro derivado entre C y T:

$$u' = \rho(2l - x)i,$$

por lo tanto:

$$\frac{u}{u'} = \frac{x}{2l - x},$$

o bien:

$$\frac{u}{u + u'} = \frac{x}{2l},$$

resultando:

$$x = 2l\frac{u}{u + u'}.$$

Puede darse el caso de que los dos cables no tengan la misma sección. Sean s la sección del cable puesto a tierra y s' la del cable sano; la resistencia de la porción AT del primer cable es $\frac{ax}{s}$, si a representa la resistividad del metal de que está construído el cable, y:

$$u = \frac{ax}{s}i.$$

La resistencia $TBDC$ es:

$$a\frac{l - x}{s} + a\frac{l}{s'},$$

y:

$$u' = \left(a\frac{l - x}{s} + a\frac{l}{s'}\right),$$

por lo tanto:

$$\frac{u}{u'} = \frac{\frac{x}{s}}{\frac{l - x}{s} + \frac{l}{s'}},$$

o lo que es lo mismo

$$\frac{u}{u'} = \frac{xs'}{ls' + ls - xs'}$$

de donde:

$$\frac{u}{u+u'} = \frac{xs'}{l(s'+s)},$$

resultando:

$$x = l \cdot \frac{s'+s}{s'} \cdot \frac{u}{u+u'}.$$

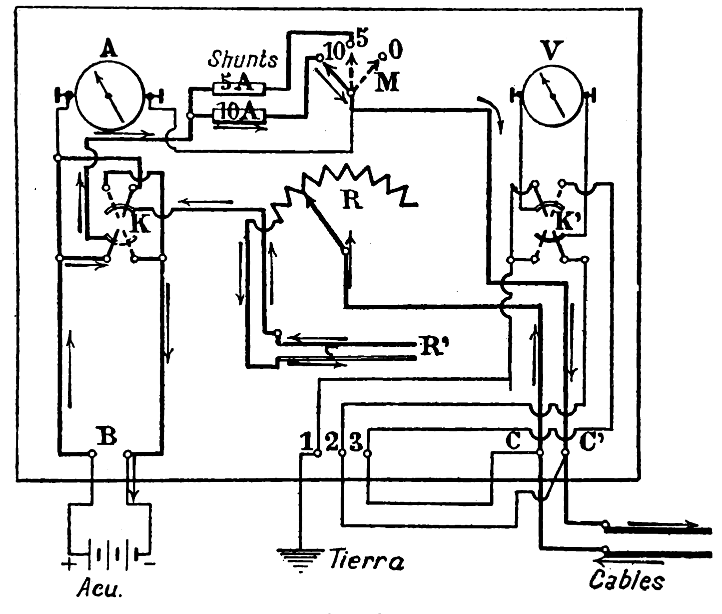


Fig. 108.

La sociedad de aparatos electroindustriales Pétrier, Tissot y Raybaud construye una caja que permite aplicar fácilmente este procedimiento. Está montada como indica el esquema de la figura 108.

La resistencia regulable está constituída por un reostato de plots R y, en serie con él, un hilo con cursor R'. La corriente se comprueba con el amperímetro A en derivación sobre uno de los shunts 5 amperes y 10

amperes, introducidos en el circuito por el conmutador *M*. La corriente es enviada a los cables en uno o en otro sentido con ayuda del conmutador *K*; el conmutador *K'* permite derivar el voltímetro *V*, graduado de 0 a 100 milivolts, entre la tierra y cada una de las extremidades de los cables *C* y *C'*.

La caja lleva siete bornes. Los dos cables se conectan a los bornes *C* y *C'*. El borne *1*, del grupo *1*, *2*, *3*, va unido a tierra, por ejemplo, a la envuelta de plomo de un cable, y los bornes *2* y *3* van conectados con las *c* y *c'*.

Entre los bornes *B* se deriva la batería de acumuladores.

II. — Medida de la resistencia interior de una pila

a) 1.º Se determina mediante un voltímetro derivado entre sus polos, en circuito abierto, la f. e. m. de la pila, que llamaremos *E*;

2.º Se monta la pila sobre una resistencia conocida, convenientemente tomada, *R*, y se mide la diferencia de potencial en los bornes, que supondremos *u* (figura 109).

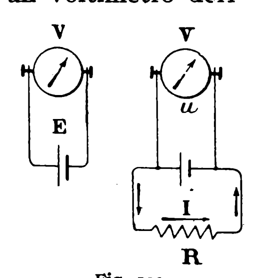


Fig. 109.

La corriente que pasa por la resistencia *R* tiene por valor:

$$I = \frac{E}{R + \rho}$$

siendo ρ la resistencia de la pila.

Esta corriente tiene también por valor el siguiente:

$$I = \frac{u}{R},$$

luego:

$$\frac{E}{R+\rho}=\frac{u}{R},$$

de donde:

$$\frac{E}{R+\rho}=\frac{u}{R}=\frac{E-u}{\rho}$$

resultando finalmente:

$$\rho=R\frac{E-u}{u}.$$

La resistencia R no debe ser demasiado grande, porque u se acercaría mucho a E y el error relativo en $E-u$ sería muy grande, con lo cual se tendría una pequeña aproximación; tampoco R debe ser muy pequeña, porque la pila se polarizaría y u decrecería rápidamente, resultando imposible su medida. Sería muy conveniente tomar para R un valor tal que la corriente I fuera aproximadamente igual a la corriente que la pila debe producir normalmente.

b) **Método del falso cero (método de Mance).** — Se emplea el puente de Wheatstone en el cual la pila está colocada en el sitio de la resistencia desconocida, sobre una de las ramas del puente. Sobre una de las diagonales hay una resistencia de 100 ohms; sobre la otra diagonal hay un galvanómetro con una resistencia de 3000 a 4000 ohms en serie y shuntado por una resistencia de 100 ohms. El montaje es el indicado por el esquema de la figura 110.

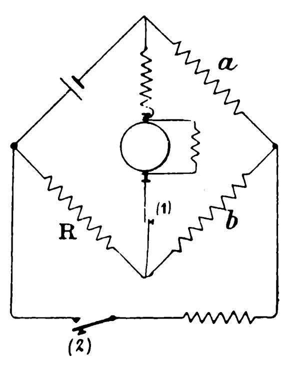


Fig. 110.

Cuando se cierra la llave (1), el cuadro del galvanómetro se desvía y la imagen toma una cierta posición sobre la regla; si entonces se baja la llave (2) manteniendo siempre cerrada la (1), se ve correrse esta imagen. Se regulan las resistencias del puente de modo que estando cerrada la llave (1), la desviación no varíe al cerrar la llave (2). Cuando se cumple esta condición, se tiene:

$$\rho \times b = R \times a,$$

de donde:

$$\rho = R \times \frac{a}{b}.$$

III.—Medida de la resistencia de un galvanómetro Método del falso cero (Thomson)

También para esta medición se emplea el puente Wheatstone: el galvanómetro se monta en una rama del puente, en el sitio donde ordinariamente se coloca la resistencia que se trata de medir. Sobre una de las diagonales hay un simple conductor con un interruptor (1), y sobre la otra diagonal hay una pila y un interruptor (2), como se ve en la figura 111.

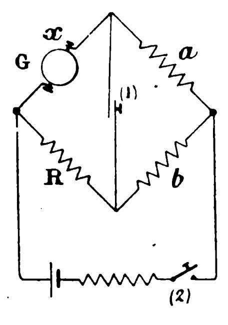


Fig. 111.

Si se cierra la llave (2), el galvanómetro es recorrido por una corriente y el cuadro experimenta una desviación; el método de Thomson consiste en regular la resistencia R de modo que esta desviación no cambie al cerrar el interruptor (1). Cuando esta condición queda satisfecha se tiene:

$$x \times b = R \times a,$$

de donde:

$$x = R \times \frac{a}{b}.$$

No debiendo ser atravesado el galvanómetro más que por corrientes muy pequeñas, es preciso poner en serie con la pila una resistencia bastante grande, de 10000 a 20000 ohms.

EJERCICIOS

1.° Medida de una resistencia valiéndose de un voltímetro y de un amperímetro

a) *Medida de la resistencia del circuito inductor de una dinamo*

Se separa el circuito inductor de las escobillas y se hace

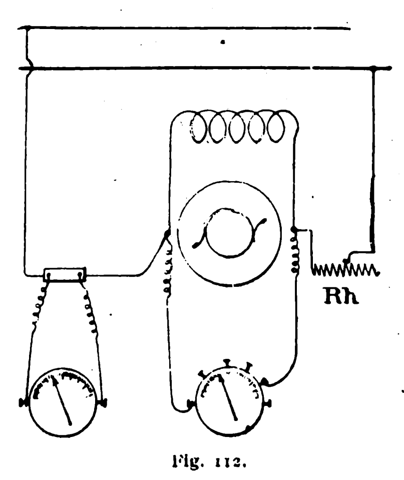


Fig. 112.

el montaje indicado por la figura 112. Se hacen varias lecturas variando por medio del reostato *Rh* la corriente

en la excitación. Es conveniente tomar la precaución de no cortar la corriente cuando el voltímetro está derivado, porque la extracorriente de ruptura daría lugar a choques violentos de la aguja del voltímetro, que podría doblarse y hasta romperse.

Los resultados obtenidos se resumen en un cuadro como el siguiente:

AMPERÍMETRO — Shunt:		VOLTÍMETRO — Sensibilidad:		RESULTADO
Lecturas	Amperes: I	Lecturas	Volts: U	$R = \frac{u}{I}$

b) *Estudio de las variaciones de resistencia en ciertos conductores con la temperatura*

Se efectúa el montaje de la figura 113: se toma sucesivamente como conductor un filamento de carbón (lámpara de

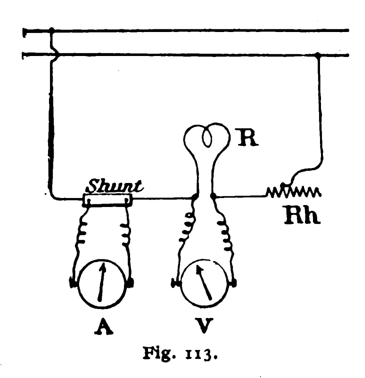


Fig. 113.

incandescencia), un hilo de hierro (resistencia de lámpara Nernst), un filamento de lámpara de tántalo, Osram, etc.

Se hace variar la corriente en la lámpara por medio de la tensión del generador, por ejemplo, variando el número de elementos de una batería de acumuladores y mediante el reostato *Rh*, y se forma un cuadro como el que sigue:

AMPERÍMETRO Shunt: 1 amp.		VOLTÍMETRO			POTENCIA	RESISTENCIA
Lecturas	Amperes: I	Sensibilidades	Lecturas	Volts: u	$u \times I$	$R = \frac{u}{I}$

Siendo siempre la intensidad menor de 1 ampere, se toma el shunt de 1 ampere; en cuanto a la diferencia de potencial en los bornes de la lámpara, toma valores muy diferentes, por lo cual es preciso utilizar varias sensibilidades para el voltímetro.

Para cada uno de los conductores estudiados, se traza una curva cuyas abscisas sean los valores de la potencia absorbida y transformada en calor:

$$W = u \times I \text{ watts,}$$

o sea:

$$W = u \times I \times 0{,}24 \text{ calorías por segundo,}$$

y por ordenadas los valores correspondientes de la resistencia:

$$R = \frac{u}{I} \text{ ohms.}$$

De este modo se comprueba que la resistencia del carbón disminuye cuando la cantidad de calor absorbida aumenta y por consiguiente cuando la temperatura se eleva. Al contrario, la resistencia de los metales aumenta al aumentar la temperatura.

2.º Medida de una resistencia pequeña

a) *Medida de la resistencia del inducido de una dinamo*

Se separan los circuitos inducidos e inductor y se hace el montaje que se ve en la figura 114. Se hace pasar por el circuito una corriente de intensidad próxima a la intensidad normal de la corriente producida por la máquina, si la resistencia de comparación R la puede soportar; en caso contrario se hace pasar la corriente máxima que esta resistencia pueda resistir. Se mide la d. d. p. u entre las escobillas de la dinamo, y después entre los extremos de R, y sea u' esta d. d. p.; hay que comprobar que la corriente es exactamente la misma durante las dos lecturas.

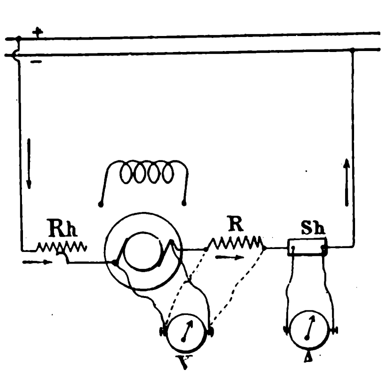


Fig. 114.

Se hacen varias mediciones tomando el inducido en varias posiciones respecto a las escobillas, y se resumen los resultados en el cuadro siguiente:

Amperímetro — Shunt:		Voltímetro entre escobilla — Sensibilidad:		Voltímetro en los bornes de R — Sensibilidad:		Resistencia
Lecturas	Amperes	Lecturas	Volts: u	Lecturas	Volts: u'	$x = R \frac{u}{u'}$

OBSERVACIÓN.—Como las escobillas de carbón tienen en general una resistencia bastante elevada (comparable a la del inducido), es preciso derivar el voltímetro entre dos placas metálicas sujetas debajo de las escobillas, en vez de derivarlo entre éstas directamente.

b) *Determinación de la resistencia de un metal*

Sobre el hilo AB de que se trate, se arrolla en dos puntos M y N una espira de un hilo fino de cobre, que se fija mediante un grano de soldadura (fig. 115).

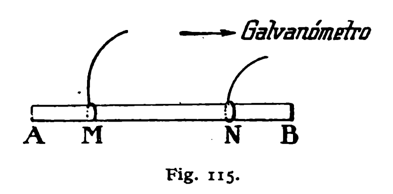


Fig. 115.

Se mide la longitud l en centímetros que hay entre M y N, y se toma el diámetro de este hilo con un *palmer;* sea d mm. este diámetro (hay que asegurarse de que este hilo tiene exactamente el mismo diámetro en toda su longitud). Es evidente que la sección de este hilo será $\frac{\pi d^2}{4}$ mm² ó $s = \frac{\pi d^2}{400}$ cm². Se toma como resistencia de comparación un shunt de amperímetro, por ejemplo, un shunt de 3 amperes, de resistencia $r = 40\,000$ microhms, y se efectúa el montaje de la figura 116.

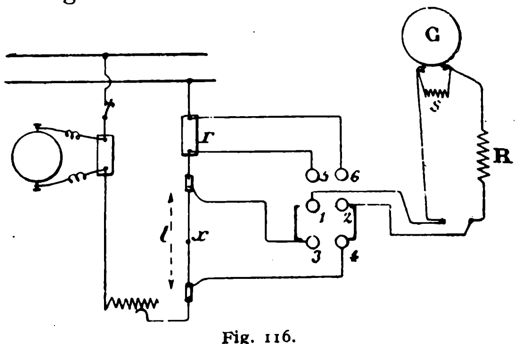


Fig. 116.

Por el circuito que comprende el hilo y el shunt r se hace pasar una corriente adecuada, todo lo más alta que

sea posible, pero insuficiente para calentar de un modo apreciable el conductor que se estudia. Se colocan dos horquillas de cobre en los contactos de mercurio 1 y 3, 2 y 4, y se toman R y s de modo que se obtenga una desviación de 20 cm. aproximadamente. Sea α esta desviación.

Se quitan las horquillas de cobre y se colocan en las posiciones 1-5, 2-6, y se comprueba que la corriente no ha cambiado; se lee entonces la nueva desviación α', y se establece la siguiente relación:

$$x = r \times \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

Hilo soldado
Empalme
Hilo soldado

Fig. 117.

Conociendo x se puede calcular la resistividad del metal, es decir, la resistencia de un hilo de un centímetro de longitud y de un centímetro cuadrado de sección, o sea:

$$\rho = x \times \frac{s}{l} \text{ microhms.}$$

c) *Medir la resistencia de un empalme* (fig. 117) *antes y después de soldarlo, y comparar los resultados.*

8.º Resistencia interior de una pila

a) *Por medio de un voltímetro y de una resistencia conocida*

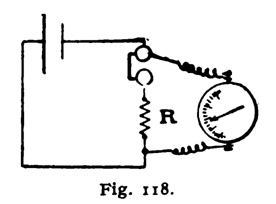


Fig. 118.

Se efectúa el montaje indicado en la figura 118. Se lee la indicación F del voltímetro antes de cerrar la pila sobre la resistencia R, y después de cerrar el circuito se lee inmediatamente la nueva indicación u del voltímetro y se abre el circuito; la resistencia interior de la pila será:

$$x = R \times \frac{E - u}{u}.$$

b) *Método de Mance*

Se utiliza la caja de Carpentier y se efectúa el montaje indicado en la figura 119; mientras se hace este montaje se quita la clavija ∞ de la caja para que la pila no se cierre sobre las resistencias *a*, *b*, *R*, y se vuelve a colocar en su sitio al hacer la medición.

Por ejemplo, se toma $a : b = 1 : 100$, y para R se toma un valor próximo al que se supone que tiene la pila, multiplicado por 100, y se regula el shunt y la resistencia en

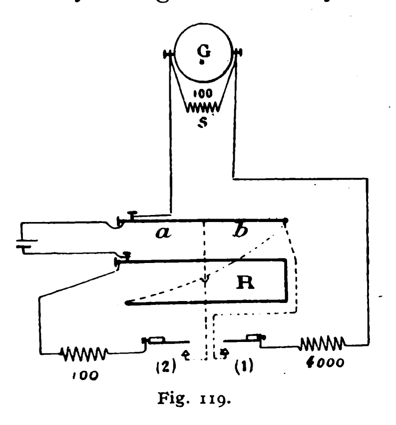


Fig. 119.

serie del galvanómetro de modo que se obtenga una desviación bastante grande (pero sin que la imagen salga de la regla), cuando se cierra la llave (1). Se regula la resistencia R para que estando cerrada la llave (1) la desviación no varíe al cerrar la llave (2).

Se repite la medida para la misma pila tomando valores diferentes para la resistencia en serie y el shunt del galvanómetro, y se buscan los valores de estas resistencias a los cuales corresponde la mayor sensibilidad.

Después de haber medido la resistencia de la pila, se cierra sobre una resistencia pequeña, para que se polarice, y se mide al cabo de un cierto tiempo su nueva resistencia, que será mayor que la primera. De este modo se mide la

resistencia de tres pilas, se montan en serie, se mide la resistencia del grupo y se ve si ésta es igual a la suma de las resistencias de los tres elementos; se determina el error, caso de haberlo.

4.° Resistencia de un galvanómetro

Con la caja-puente se hace el montaje de la figura 120. Se cierra el interruptor (1); después de haber tomado una relación $a : b$ y una resistencia R, se modifica R de tal modo que la desviación no cambie si estando cerrado (1) se cierra el interruptor (2).

Se toman varios valores de la relación $a : b$ y se ve cuál da la mayor sensibilidad. Después se calculan los poderes multiplicadores de los shunts de resistencia 10, 100, 1 000 ohms, utilizados para el galvanómetro.

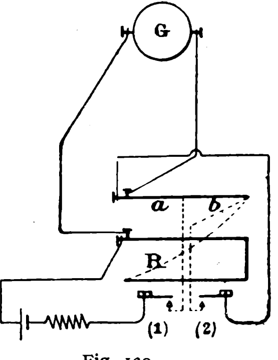


Fig. 120.

Si se dispone de otro galvanómetro, se comprueba el resultado obtenido operando sobre uno de ellos como sobre una resistencia ordinaria; bastará sujetar el cuadro para que no se desvíe cuando sea recorrido por una corriente: para ello se puede, por ejemplo, hacerlo descansar por su parte superior sobre el cilindro de hierro dulce.

CAPITULO VI

Medida de las fuerzas electromotrices y de las diferencias de potencial

Vamos a estudiar en este capítulo:

1.º Los aparatos que pueden dar indicaciones proporcionales a las tensiones medidas, que son los electrómetros y los voltímetros;

2.º Los métodos de medida que permiten la comparación de la tensión que se mide con otra tensión exactamente conocida y dada por la fuerza electromotriz de una pila patrón. Gracias a estos procedimientos o métodos de medida, se pueden graduar los aparatos antes citados y comprobar sus indicaciones.

I. Aparatos de medida

Pueden clasificarse en dos grupos diferentes: pertenecen al primero los aparatos que no son recorridos por ninguna corriente debida a la influencia de la diferencia de potencial sometida a la medida; estos aparatos toman una carga que es función de la tensión, y por efecto de fenómenos estáticos, la parte móvil toma una posición de la cual se deduce el valor de esta tensión; estos aparatos son los *electrómetros*. En el segundo grupo se encuentran los aparatos que son recorridos por una

corriente, y por efecto de fenómenos producidos por esta corriente, la parte móvil toma una posición de equilibrio determinada por el valor de la tensión; estos aparatos son los *voltímetros*.

Electrómetros. — El tipo de estos aparatos es el electrómetro de cuadrantes, debido a lord Kelvin.

Un electrómetro de cuadrantes consta en esencia de un cilindro de cobre dividido en cuatro partes A, B, C, D, de las cuales van unidas eléctricamente entre sí dos a dos opuestas, como la AC y BD. Por dentro de este cilindro van suspendidas de un hilo metálico dos paletas cilíndricas M unidas por tirantes por sus partes superior e inferior (fig. 121). El cilindro interior M constituye un condensador con cada par de cuadrantes (un condensador consiste en dos conductores separados por un aislador, aire por ejemplo). Supongamos que se comunica al cuadro M un potencial V y a los pares de cuadrantes AC y BD respectivamente los potenciales V_1 y V_2. El condensador formado por M y A-C tomará una carga proporcional a la diferencia de potencial $V_1 — M$.

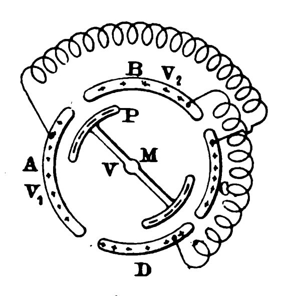


Fig. 121.

Los cuadrantes AC y el cilindro M estarán cargados de cantidades iguales de electricidad de signo contrario; M será solicitado hacia A y C, y se demuestra que el par que actúa sobre M tiene por valor $K_1 (V_1 — V)^2$. Del mismo modo, el condensador formado por M y los cuadrantes B, D toma una carga proporcional a $V_2 — V$, y la aguja será solicitada hacia B y D por un par $K_1 (V_2 — V)^2$, siendo K_1 una constante del aparato.

De aquí se deduce que la aguja está sometida a un par resultante:

$$K_1[(V_1 - V)^2 - (V_2 - V)^2].$$

Bajo la influencia de este par, el cilindro M gira y el hilo de suspensión se tuerce produciendo un par proporcional al ángulo de torsión. Es decir, que girará en un ángulo α tal que los dos pares sean iguales, o sea:

$$(1) \qquad K_1[(V_1 - V)^2 - (V_2 - V)^2] = K_2\alpha$$

donde K_2 es el par desarrollado por una torsión del ángulo de suspensión igual a la unidad de ángulo.

Esta igualdad (1) puede escribirse del modo siguiente:

$$V_1^2 + V_2^2 - 2VV_1 - V_2^2 - V^2 + 2VV_2 = \frac{K_2}{K_1}\alpha$$

$$(V_2 - V_1)\ (2V - V_1 - V_2) = K\alpha,$$

poniendo $\frac{K_2}{K_1} = K.$

Si se hace $V = V_2$, lo cual equivale a poner en comunicación el cilindro M con los cuadrantes B, D, se tiene:

$$(V_2 - V_1)^2 = K\alpha.$$

En este caso la desviación del cilindro M es proporcional al cuadrado de la diferencia de potencial aplicada entre los dos pares de cuadrantes.

En la industria se utilizan aparatos de esta clase, con el nombre de voltímetros electrostáticos.

Voltímetro electrostático de Carpentier. — Los cuadrantes están constituídos por dos cilindros concéntricos divididos en cuatro sectores; el cilindro de dentro es de hierro dulce, y el de fuera de latón. Entre estos dos cilindros puede moverse un cuadro rectangular de aluminio completamente cerrado, móvil alre-

dedor de un eje horizontal y que lleva una aguja que puede girar frente a una escala graduada en volts. El

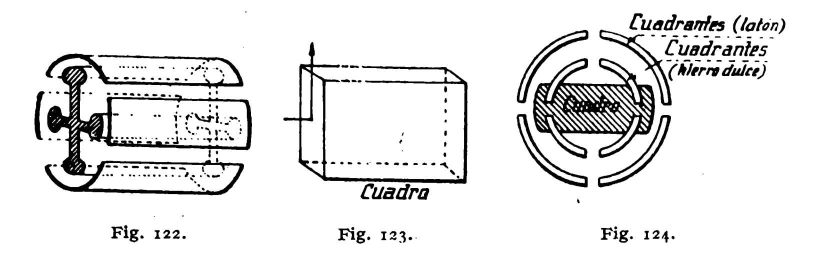


Fig. 122. Fig. 123. Fig. 124.

par antagonista es producido por la acción de la gravedad. Un imán permanente, cuyas piezas polares

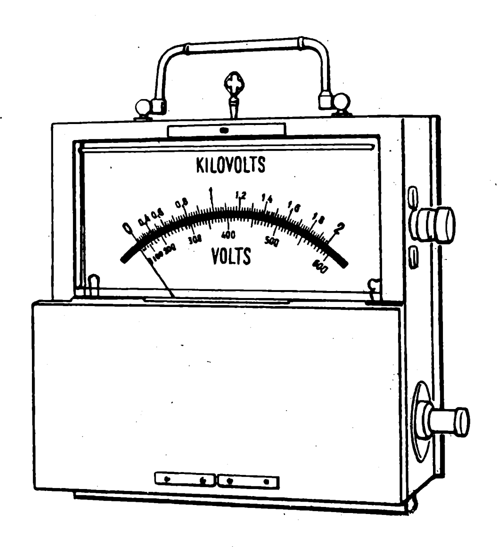


Fig. 125. — Voltímetro electrostático de Carpentier.

rodean a los cilindros, amortigua las oscilaciones del cuadro (figs. 122 a 124). Estos aparatos se construyen

generalmente para tensiones comprendidas entre 500 y 6 000 volts (fig. 125).

Multicelular de lord Kelvin. — La parte móvil está formada de varias agujas en forma de 8 unidas por una varilla vertical suspendida de un hilo metálico muy fino. Estas agujas penetran entre sectores fijos de latón, que forman tantas celdillas o células como agujas (fig. 126).

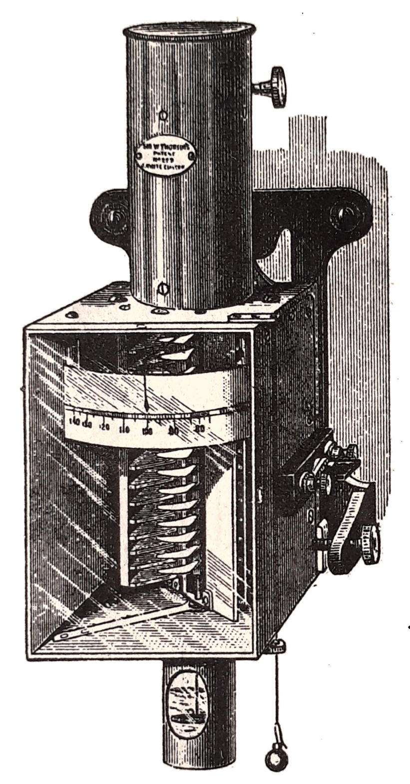


Fig. 126.

El amortiguamiento se obtiene por la resistencia opuesta por el aceite contenido en la caja.

Estos aparatos son menos susceptibles de desarreglarse que los voltímetros, por lo cual se emplean frecuentemente como aparatos patrones para comparar los voltímetros. Como la desviación de la aguja es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada entre sus bornes, estos aparatos pueden emplearse para medir tensiones alternas, dando sus valores eficaces.

Voltímetro electrostático Abraham y Villard para altas tensiones. — Este aparato está constituído por un condensador, una de cuyas armaduras consiste

en un ancho platillo P (fig. 127) mantenido verticalmente por un soporte aislador, y la otra en el fondo, ligeramente bombeado, de una cápsula C de aluminio batido. Esta cápsula está fijada al extremo de una varilla horizontal AA' suspendida mediante dos tiras muy finas de acero, RR'; el otro extremo de esta varilla termina en un amortiguador de aire B. El movimiento de la cápsula se transmite a una aguja mediante un sistema de palancas L; el amortiguamiento de las oscilaciones de la aguja se verifica por medio de una lámina metálica M que se mueve al mismo tiempo que la aguja, entre los polos de un imán D.

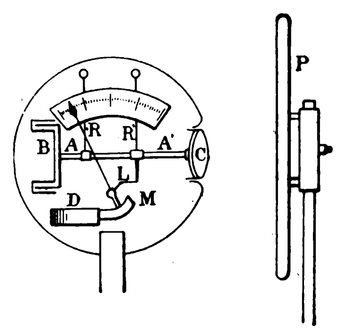
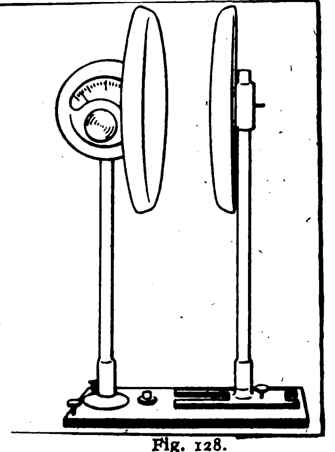


Fig. 127.


Fig. 128.
Voltímetro electrostático Abraham-Villard.

Todos estos órganos van encerrados en una caja que lleva un orificio por el cual se puede mover la cápsula C.

Cuando se aplica una diferencia de potencial al sistema formado por la caja y el platillo, estas dos armaduras toman cargas de signo contrario, y la cápsula C se mueve hacia el platillo, transmitiendo su movimiento a la aguja, hasta que el par desarrollado por las tiras R, R', que son verdaderos muelles, equilibra a la fuerza de atracción.

Se puede variar la sensibilidad del aparato acer-

cando más o menos el platillo a la caja; una separación de 10 a 20 centímetros es la indicada para tensiones que no pasen de 200 000 volts.

En la figura 128 se ve en perspectiva el aparato que acabamos de describir.

Voltímetros. — Para el estudio de estos aparatos, remitimos al lector al tomo I de esta obra (GENERALIDADES) (pág. 223).

II. Métodos de medida

Los métodos de medida que vamos a exponer tienen por objeto:

1.º Determinar el valor de la fuerza electromotriz de un elemento de pila;

2.º Comprobar las indicaciones de los voltímetros, y por consiguiente, corregirlas si es preciso;

3.º Graduar los voltímetros y los electrómetros.

Para la aplicación de estos métodos se utiliza una pila patrón Latimer-Clark, Weston o Daniell.

I. **Determinación de la fuerza electromotriz de un elemento de pila.** — MÉTODO DE OPOSICIÓN. — Sea una resistencia AB recorrida por una corriente de intensidad constante I, que vaya de A a B. Unamos el polo positivo de la pila que se estudia con el punto A, y el otro polo con un galvanómetro, y corramos a lo largo de AB el extremo de un conductor fijado al segundo borne del galvanómetro (fig. 129).

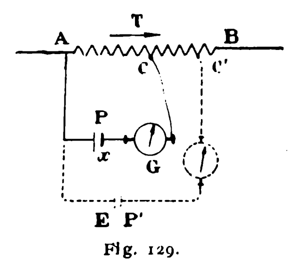


Fig. 129.

Si la resistencia AB tiene un valor suficiente, encontraremos un punto C para el cual el galvanómetro no acusará desviación alguna. Sea en estas condiciones r el valor de la resistencia AC; puesto que no pasa corriente alguna por el circuito PAC, la diferencia de potencial rI entre A y C es igual a la fuerza electromotriz x de la pila; la ley de Kirchhoff aplicada al circuito cerrado APC dará:

$$x = rI. \tag{1}$$

Sustituyamos la pila en cuestión por una pila tipo P' de f. e. m. conocida E, y repitamos la misma operación; sea C el punto para el cual se tiene el equilibrio del galvanómetro, y r' la resistencia AC'. Si la corriente I se ha mantenido constante en la resistencia AC, se tiene:

$$E = r'I \tag{2}$$

y dividiendo miembro a miembro las igualdades (1) y (2), resulta:

$$\frac{x}{E} = \frac{r}{r'} \qquad x = E \times \frac{r}{r'}.$$

Para llevar a la práctica este método se forma un primer circuito que comprenda varios acumuladores, que ya hayan funcionado después de su plena carga, de modo que puedan considerarse sus f. e. m. como constantes; en este circuito va además intercalada una resistencia variable R y una resistencia regulable r cuyos diferentes valores son perfectamente conocidos (fig. 130). Por el circuito así formado circula una corriente que se mantiene constante.

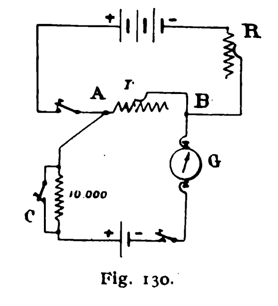


Fig. 130.

Se unen con los extremos A y B de r los dos polos de la pila de que se trate, a través de un galvanómetro G y de una resistencia de protección de 10 000 ohms, por ejemplo, que pueda ponerse en cortocircuito con una llave c. Esta resistencia tiene por objeto evitar que la pila dé corriente, y que por lo tanto se polarice mientras se hacen los tanteos preliminares a la prueba que sirven para buscar el valor de r necesario para que la diferencia de potencial entre A y B sea igual a la fuerza electromotriz de la pila, lo cual se conocerá porque el cuadro del galvanómetro no experimentará variación alguna.

Cuando se está cerca de este valor, se puede poner la resistencia de protección en cortocircuito, con lo cual se aumenta la sensibilidad y se puede fijar con más exactitud el valor de r. Sea a el valor que se obtiene de este modo para r; el valor de la corriente I será:

$$\frac{E}{R+a},$$

y siendo x el valor de la f. e. m. de la pila en cuestión, se tendrá:

$$x = a\frac{E}{R+a}, \tag{1}$$

donde E es la d. d. p. en los bornes de la batería de acumuladores.

Se sustituye después el elemento estudiado por una pila tipo de f. e. m. conocida E_1, y se busca como antes el valor b de r, para el cual el cuadro del galvanómetro no se desvía; en este caso se tiene del mismo modo:

$$E_1 = b\frac{E}{R+b} \tag{2}$$

y dividiendo ordenadamente las igualdades (1) y (2) resulta:

$$\frac{x}{E_1} = \frac{a}{b} \times \frac{\frac{E}{R+a}}{\frac{E}{R+b}},$$

de donde:

$$x = E_1 \times \frac{a}{b} \times \frac{R+b}{R+a}.$$

En realidad, el método de oposición sólo se aplica de uno de los dos modos siguientes:

a) *Dispositivo de Bouty.* — Se tiene un circuito constituído por varios acumuladores y por dos cajas de resistencias de 11 110 ohms A y B. Todas las clavijas de una de ellas están quitadas, mientras que las de la otra están en sus alojamientos correspondientes, y durante la medida se lleva una clavija de la una al agujero o alojamiento correspondiente en la otra, de modo que se mantenga constante la resistencia del circuito, en el valor de 11 110 ohms. De este modo la corriente i en el circuito será también constante.

Entre los extremos de una de las cajas B se coloca primero la pila estudiada y después la pila tipo, a través de un galvanómetro y de una resistencia de protección que se pueda poner en cortocircuito (fig. 131). Sea r_1 la resistencia de la caja B para la cual el cuadro del galvanómetro no experimenta la menor desviación al cerrar el interruptor (1) sobre la pila estudiada de f. e. m. x; se tendrá:

$$x = r_1 i;$$

sea r_2 la resistencia de la caja B para la cual se cumple esta misma condición cuando se cierra el interruptor (2)

sobre la pila patrón de f. e. m. E; análogamente se tendrá:

$$E = r_2 i;$$

dividiendo la primera igualdad por la segunda, resulta:

$$\frac{x}{E} = \frac{r_1}{r_2}, \qquad x = E \times \frac{r_1}{r_2}.$$

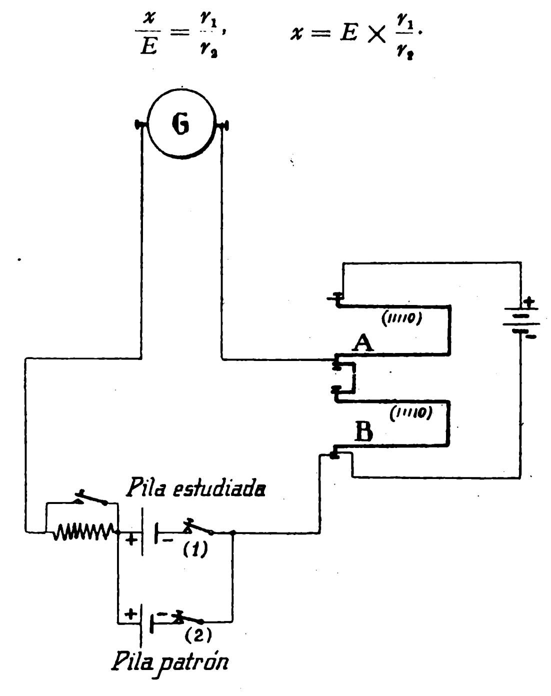


Fig. 131.

b) *Dispositivo de Clark.* — Se forma un circuito con un alambre calibrado AB de maillechort, tenso frente a una regla metálica graduada en milímetros (con un cursor que corra a lo largo de la regla se puede unir ésta con un punto del alambre), una resistencia variable R cuyo valor no importa conocer, y una batería de varios acumuladores. Entre uno de los extremos A del hilo y el cursor C pueden intercalarse

sucesivamente, por medio del inversor I, la pila estudiada de f. e. m. x y una tipo de f. e. m. conocida E, a través de un galvanómetro G y de una resistencia de protección r, que puede ponerse en cortocircuito (fig. 132). Una vez tomada convenientemente R, se coloca el inversor sobre la pila estudiada y se corre C hasta que el cuadro del galvanómetro no experimente ninguna desviación; sea l la longitud AM leída sobre la regla. Si i es la corriente producida por los acumuladores y que pasa por el hilo AB, siendo K la resistencia por unidad de longitud de este hilo, se tendrá:

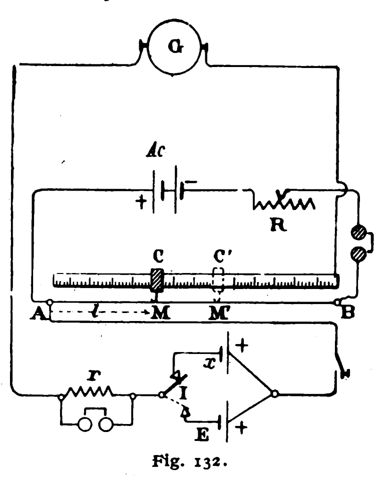


Fig. 132.

$$x = Kl \times i.$$

Por medio del inversor I se sustituye entonces la pila de que se trata por la pila patrón, y se busca la posición del cursor $C'M'$ para la cual el cuadro del galvanómetro no se desvía, teniéndose, llamando l' a la longitud AM':

$$E = Kl' \times i,$$

de donde, dividiendo la primera igualdad por la segunda:

$$\frac{x}{E} = \frac{l}{l'}, \qquad x = E \times \frac{l}{l'}.$$

A este dispositivo se le llama *potencíómetro de Clark.*

II. Graduación y comprobación de los voltímetros.

a) *Empleo de un galvanómetro montado en voltímetro.* — Según sabemos, un voltímetro está constituído por un cuadro galvanométrico con el cual se pone en serie una resistencia elevada. Para montar el galvanómetro en voltímetro bastará, por lo tanto, ponerle en serie una resistencia suficiente, por ejemplo, una caja de 11110 ohms, shuntándola por medio de una resistencia, variable según la magnitud de las tensiones que se traten de medir (figura 133).

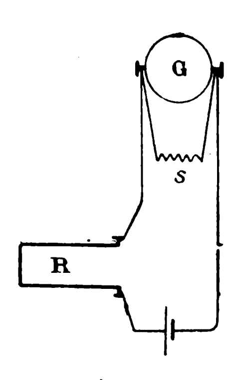


Fig. 133.

Para graduar en volts la escala de la regla, es decir, para determinar a cuántos volts equivale una división de esta escala, se emplea un elemento patrón, por ejemplo, un elemento Daniell, cuya f. e. m. es de 1,10 volt. Se busca entonces cuáles han de ser las resistencias en shunt y en serie para que estando colocado este elemento en los bornes del aparato, como ya hemos dicho, se tenga en la escala una desviación de 110 milímetros. En estas condiciones, 1 volt estará medido por una desviación de 100 milímetros.

Montado el galvanómetro de este modo podrá medir pequeñas tensiones, y por consiguiente servirá para graduar o comprobar voltímetros de muy poca sensibilidad.

Para tensiones más elevadas, se calculan las nuevas resistencias en serie y en derivación que corresponden a una sensibilidad dada. Supongamos, por ejemplo, que se quiera obtener una división de la regla, es decir, 1 milímetro de la escala, por volt.

Sean R y s las resistencias en serie y en shunt que

dan 110 divisiones con el elemento Daniell; E' y s' las nuevas resistencias que dan una división por volt, es decir, tales que 100 volts dan la misma desviación que 1 volt con las resistencias anteriores R y s.

Si en el primer caso se aplica 1 volt en los bornes del galvanómetro, la corriente que lo atraviesa será:

$$\frac{1}{R+\frac{gs}{g+s}} \times \frac{s}{g+s}.$$

En el segundo caso, aplicando 100 volts, la corriente que pasa por el galvanómetro será:

$$\frac{100}{R'+\frac{gs'}{g+s'}} \times \frac{s'}{g+s'}.$$

Por consiguiente, se debe tener:

$$\frac{1}{R+\frac{gs}{g+s}} \times \frac{s}{g+s} = \frac{100}{R'+\frac{gs'}{g+s'}} \times \frac{s'}{g+s'}.$$

Por ejemplo, se puede tomar $s = s'$, y R' quedará determinada por la relación:

$$\frac{1}{R+\frac{gs}{g+s}} \times \frac{s}{g+s} = \frac{100}{R'+\frac{gs}{g+s}} \times \frac{s}{g+s}$$

o sea:

$$R' + \frac{gs}{g+s} = 100\,R + 100\,\frac{gs}{g+s}$$

de donde:

$$R' = 100\,R + 99\,\frac{gs}{g+s}.$$

Una vez determinada R', y mediante un inversor I se ponen sucesivamente en comunicación con los bornes

del galvanómetro y con los del voltímetro que se quiere graduar, los polos de un generador cuya tensión se pueda variar, por ejemplo, de una batería de acumuladores (fig. 134).

b) *Empleo de un galvanómetro balístico y de una capacidad conocida.* — Se empieza por *tarar* el galvanómetro balístico, para lo cual se carga el condensador C con un generador cuya f. e. m. E se conozca exactamente; este condensador tomará una carga CE; se descarga después sobre el balístico, y se lee la desviación θ, teniéndose evidentemente:

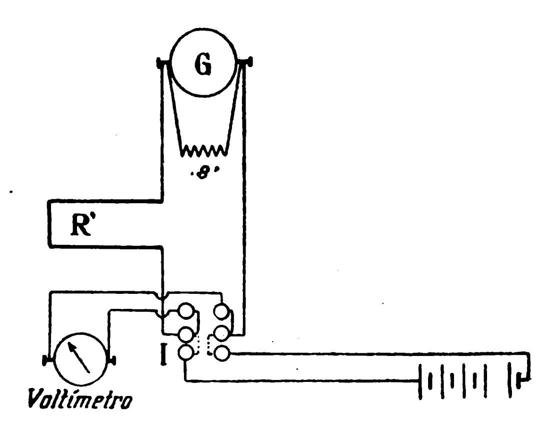


Fig. 134.

$$CE = K\theta.$$

Conociendo CE y θ, se deduce inmediatamente la constante K.

Hecho esto, para comprobar o graduar el voltímetro se carga el mismo condensador mediante un generador de tensión variable, y después se le descarga sobre el balístico; sean θ_1, θ_2... θ_n las elongacio-

nes obtenidas con las tensiones V_1, V_2... V_n; se tendrá:

$$CV_1 = K\theta_1,\ CV_2 = K\theta_2,\ \ldots\ CV_n = K\theta_n,$$

de donde:

$$V_1 = \frac{K\theta_1}{C},\quad V_2 = \frac{K\theta_2}{C} \ldots\quad V_n = \frac{K\theta_n}{C}.$$

Después de cada descarga sobre el balístico, se unen los polos del generador con los bornes del voltímetro, y se marcan frente a cada posición de la aguja los valores obtenidos V_1, V_2... V_n, o bien se comparan las indicaciones del voltímetro (si se trata de comprobarlo) con los valores V_1, V_2... V_n (figura 135).

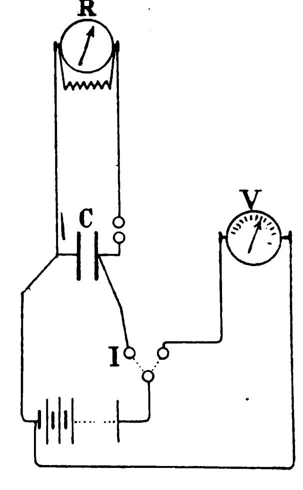


Fig. 135.

Curva de corrección. — Conviene con frecuencia establecer una curva de corrección que permita determinar rápidamente para cada indicación del voltímetro la tensión exacta aplicada en sus bornes.

Para ello se toman como abscisas las indicaciones del voltímetro, y como ordenadas las diferencias entre la tensión verdadera y la leída; estas diferencias se toman en el sentido de las ordenadas positivas cuando deben sumarse a las lecturas, y en sentido contrario cuando deben restarse.

Voltímetro compoundado destinado a dar a la central la tensión en los extremos de los feeders. — Para

dar a la central generatriz la tensión en el centro de distribución, se pueden utilizar hilos pilotos, que unen los extremos de los feeders con un voltímetro del cuadro. Esta instalación es bastante costosa, puede ocasionar varios inconvenientes, y no siempre da las garantías que fueran de desear. Pero se la puede sustituir por un voltímetro en el cual el cuadro móvil sea recorrido por una corriente resultante de dos corrientes de sentido contrario, una de ellas debida a la tensión E al salir de la central, y otra a la caída de tensión ρI en los feeders (ρ es la resistencia de los feeders, e I la corriente que los recorre), de tal modo que el voltímetro indicará la tensión $U = E - \rho I$ en el centro de distribución.

Este aparato, llamado *voltímetro compoundado*, ha sido construído por la casa Chauvin et Arnoux, del modo siguiente: el circuito del cuadro galvanométrico está derivado, a través de un devanado de resistencia r igual a la suya propia, entre los extremos de un shunt puesto en uno de los hilos de línea; además, dicho circuito está derivado entre los dos hilos de línea a la tensión E, a través de una resistencia elevada R, como se ve en la figura 136.

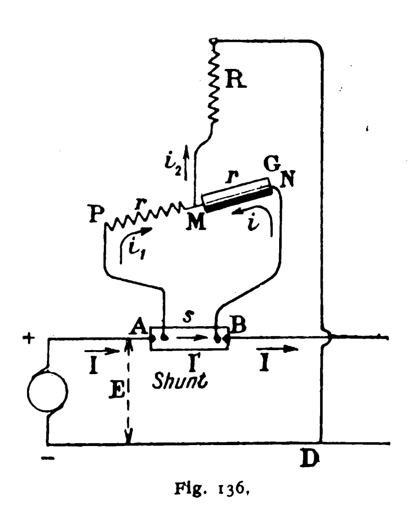


Fig. 136.

Sean s la resistencia del shunt, I' la corriente que lo recorre, i la corriente en el cuadro G, i_1 la corriente en la resistencia PM, e i_2 la corriente en

la resistencia R. Aplicando la ley de Kirchhoff al vértice M, se tiene:

(1) $$i = i_2 - i_1.$$

En el contorno cerrado $AMRD$ se tiene:

(2) $$E = ri_1 + Ri_2.$$

En el vértice A se tiene análogamente:

(3) $$I = I' + i_1,$$

y en el contorno $AMNB$:

(4) $$ri_1 - ri - sI' = 0.$$

Sustituyendo en (4) I' por su valor, deducido de (3), resulta (siendo s la resistencia del shunt):

$$ri_1 - ri = sI - si_1,$$

de donde:

$$i_1(r + s) = sI + ri.$$

Despejando en esta igua'dad el valor de i_1 y sustituyéndolo en (2), se tiene:

$$i_2 = \frac{E(r + s) - rsI - r^2 i}{R(r + s)}.$$

Y llevando a (1) los valores de i_1 y de i_2:

$$i = \frac{E(r + s) - rsI - r^2 i}{R(r + s)} - \frac{sI + ri}{r + s}$$

$$Rri + Rsi = E(r + s) - rsI - r^2 i - RsI - Rri$$

$$i(2Rr + Rs + r^2) = E(r + s) - I(rs + Rs)$$

$$i = \frac{E(r + s) - sI(R + r)}{r(2R + r) + Rs}$$

o sea, escrito de otro modo:

$$i = \frac{r + s}{r(2R + r) + Rs}\left[E - \frac{s(R + r)r}{r + s} I\right]$$

El valor del shunt s se determina de modo que se tenga (siendo ρ la resistencia de los feeders):

$$\frac{s(R+r)}{r+s}=\rho$$

de donde:

$$s=\frac{r\rho}{R+r-\rho}.$$

Sustituyendo este valor de s en la expresión

$$\frac{r+s}{r(2R+r)+Rs}$$

resulta:

$$\frac{r+\frac{r\rho}{R+r-\rho}}{r(2R+r)+R\frac{r\rho}{R+r-\rho}}=$$

$$=\frac{R+r}{(R+r)(2R+r)-\rho(2R+r)+R\rho}=\frac{1}{2R+r-\rho}.$$

Por consiguiente:

$$i=\frac{1}{2R+r-\rho}(E-\rho I).$$

Ahora bien, la resistencia de los feeders es despreciable comparada con $2R+r$, por lo cual puede reducirse la anterior expresión del valor de i del modo siguiente:

$$i=\frac{1}{2R+r}(E-\rho I).$$

El voltímetro es evidente que dará indicaciones proporcionales a la tensión $E-\rho I$ en el centro de distribución; bastará regular la resistencia del shunt de modo que $s=\frac{r\rho}{R+r-\rho}$. Esta resistencia varía al

variar la del feeder, por lo cual ha de ser mayor mientras más grande sea la de éste.

En el caso de una distribución con tres hilos, se pueden emplear dos voltímetros compoundados, cada uno de los cuales tenga dos cuadros montados sobre el mismo eje y colocados en el campo de un mismo imán permanente; los pares que actúan sobre estos cuadros se suman, y se demostraría, como se ha hecho para el

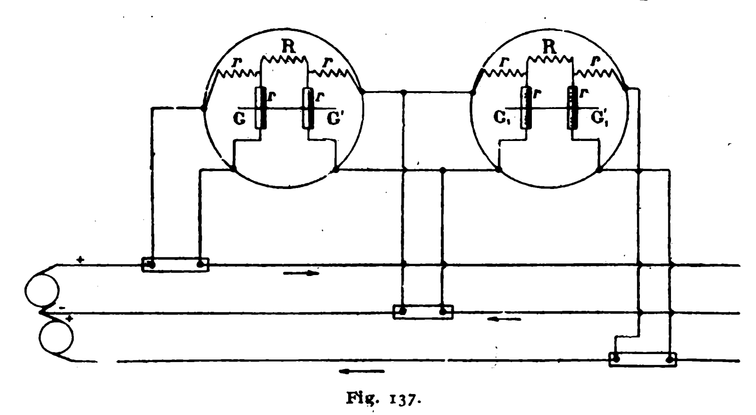


Fig. 137.

caso de una distribución bifilar, que la desviación de la aguja es proporcional a la tensión en los extremos de los feeders.

El esquema de este montaje está representado por la figura 137.

EJERCICIOS

I. — Estudio de una pila

a) *Determinación de su fuerza electromotriz*

1.º Por medio de una caja-puente, efectuar el montaje de la figura 138. Se toma, por ejemplo, $a + b = 2000$. Se cierra el interruptor I, se coloca una horquilla en las cap-

sulitas de mercurio 1-2 y se hace variar c de modo que el galvanómetro esté en equilibrio cuando se baja la llave (1).

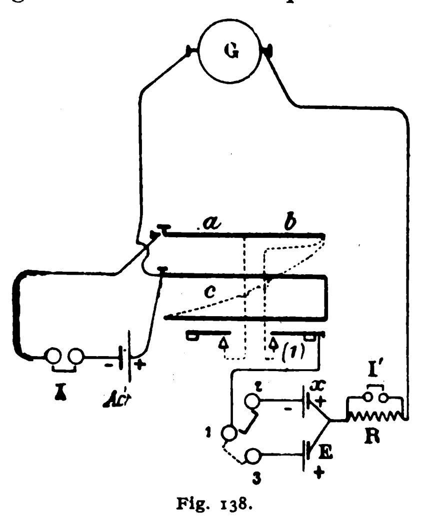


Fig. 138.

Cuando se está cerca de este equilibrio, se pone R en cortocircuito, mediante la horquilla I'. En estas condiciones se tiene:

$$x = \frac{\varepsilon \times c}{2000 + c},$$

siendo ε la fuerza electromotriz del acumulador.

Se retira la horquilla de 1-2, y se abre I'; colocando la horquilla en las cápsulas 1-3 y variando c para obtener el equilibrio como antes, se tiene, siendo c' el valor obtenido para c:

$$E = \frac{\varepsilon \times c'}{2\,000 + c'}$$

donde E es la f. e. m. del elemento patrón. Dividiendo la primera igualdad por la segunda, resulta:

$$\frac{x}{E} = \frac{c}{c'} \times \frac{2000 + c'}{2000 + c}$$

de donde se deduce inmediatamente el valor de x.

2.º Por el método de Bouty.

3.º Por el método de Clark, empleando el hilo que antes ha servido para montar un puente de hilo y para buscar los defectos de una línea.

Comparar los resultados obtenidos por estos tres métodos.

b) *Determinación de su resistencia interior*

La medida se hace como se ha dicho en el capítulo anterior.

c) *Curva de polarización*

El galvanómetro se gradúa en voltímetro mediante una pila tipo de Daniell, de modo que una desviación de 100 divisiones de la regla corresponda a 1 volt. Entonces se hace el montaje de la figura 139 y se opera del modo siguiente: se lee sobre la regla el valor de la f. e. m. de la pila (tensión en circuito abierto) y después se observa la aguja de los segundos de un reloj, y en el momento en que ésta pasa por el cero, se pone una horquilla en las capsulitas 1-2. En este mismo momento se lee sobre la regla la d. d. p. en los bornes de la pila, mientras que un ayudante lee la corriente sobre un amperímetro.

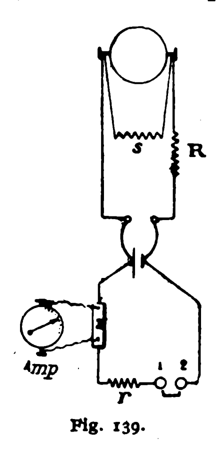


Fig. 139.

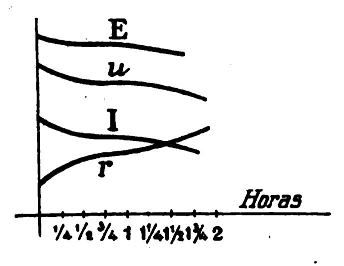


Fig. 140.

Al cabo de treinta segundos, por ejemplo, se leen simultáneamente la d. d. p. sobre la regla y la corriente sobre el amperímetro, después de lo cual se retira la horquilla y se lee con rapidez la tensión indicada sobre la regla, que mide la f. e. m. de la pila al cabo de treinta segundos de funcionamiento, poniendo en seguida otra vez la horquilla en su sitio.

Se repiten todas estas operaciones a cada treinta segundos, por ejemplo. Al cabo de un cierto tiempo, sólo se hacen las lecturas de minuto en minuto, y después de cinco en cinco minutos, luego, de cuarto en cuarto de hora, etc.

Con los resultados que se van obteniendo, se forma un cuadro como el que sigue:

$r =$

TIEMPO	FUERZA electromotriz E	DIFERENCIA de potencial u	CORRIENTE I	RESISTENCIA interior $\rho = r \frac{E - u}{u}$

Las variaciones de E, u, I y ρ, en función del tiempo, se representan gráficamente por medio de dos curvas para cada uno de estos elementos. Las primeras tienen por abscisas la duración de la corriente en segundos, y representarán las variaciones durante los primeros instantes. Las segundas tienen por abscisas la duración de la corriente en cuartos de hora, y figuran las variaciones durante una corriente de dos horas consecutivas.

Se hace que la corriente de la pila pase por una resistencia de 5 ohms y se toma para esta resistencia un hilo de maillechort, cuyo valor se haya medido con el puente.

II. — Comprobación o verificación de un voltímetro

a) *Graduación de un galvanómetro en voltímetro*

Se toma $s = 10$ ohms, por ejemplo. Se busca el valor de R para el cual la desviación sobre la regla sea de 100 divisiones en un sentido (horquillas en la posición 1-3 y 2-4), o en el contrario (posición 2-5 y 2-6 de las horquillas). De este modo se tienen 100 divisiones por volt, siendo la sensibilidad igual a 1 (fig. 141).

Se calculan los valores de R' tales que:

3	volts	den	100	divisiones	con	$s' = 20$
10	»	»	100	»	»	$s' = 10$
30	»	»	100	»	»	$s' = 5$
100	»	»	100	»	»	$s' = 1$

Comprobación. — Para comprobar los resultados que así se obtienen se sustituye la pila por una batería de acumuladores (fig. 142); se toman *R'* y *s'* calculados para que 10 volts, por ejemplo, den 100 divisiones, y se lee la desviación sobre la regla; después, conservando el mismo número de elementos en la batería, se toma *R'* y *s'* correspondien-

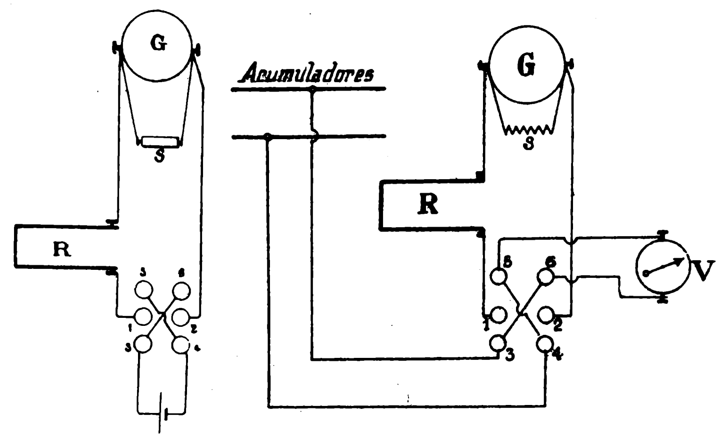


Fig. 141. Fig. 142.

tes a 30 volts para 100 divisiones, debiéndose encontrar una desviación tres veces más pequeña que la primera. Para obtener el valor de la desviación, se invierte el sentido de la desviación en el galvanómetro, se hace una lectura en los dos sentidos y se toma la media aritmética de las dos desviaciones observadas.

b) *Verificación o comprobación del voltímetro*
Curva de correcciones

Se hace variar, mediante un reductor, el número de elementos de la batería de modo que varíe la tensión en los bornes del galvanómetro y del voltímetro de 6 en 6 volts, por ejemplo. Se lee cada vez la indicación del voltímetro y las del galvanómetro tomadas en los dos sentidos, y se compara la indicación del voltímetro con la media de las dos

desviaciones del galvanómetro. Los resultados obtenidos se consignan en una tabla hecha del modo siguiente:

Indicaciones del voltímetro	Lecturas sobre la escala			Correcciones	
	a derecha	a izquierda	medias	aditivas	sustractivas

Se traza una curva que tenga por abscisas las indicaciones del voltímetro estudiado y por ordenadas las diferencias entre las indicaciones del voltímetro y la media de las lecturas hechas sobre la regla a derecha y a izquierda de la posición de equilibrio para una misma tensión. Si esta diferencia se debe sumar a la indicación del voltímetro, se toma en sentido de las ordenadas positivas, es decir, hacia arriba, y en sentido contrario si debe restarse. Los puntos resultantes se unen con un trazo continuo, teniéndose así la curva de corrección.

Observación. — Si no se dispone de una batería de acumuladores con la cual se pueda variar entre grandes límites el número de elementos, se puede proceder del modo siguiente: se cierra la batería sobre una serie de resistencias cuyos extremos estén unidos a topes o contactos 1-2-3-4... y se toma la tensión sucesivamente entre el contacto 1 y los 2-3-4... (fig. 143). De este modo se tienen las tensiones sucesivas, cuyos valores son rI, $2rI$, $3rI$, etc.

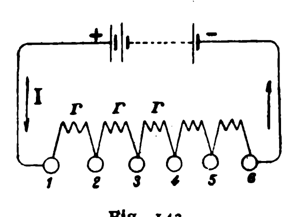


Fig. 143.

CAPÍTULO VII

Medida de las intensidades

En este capítulo vamos a estudiar:

1.º *Los aparatos de medida directa.* — Estos aparatos comprenden un circuito recorrido por la corriente; bajo la influencia de la corriente, una parte móvil gira en un cierto ángulo cuya magnitud es una función de la intensidad; por consiguiente, estos aparatos pueden graduarse en amperes;

2.º *Los métodos de medida,* que permiten determinar el valor de una corriente y por lo tanto graduar los aparatos anteriores.

I. — Aparatos de medida

Estos aparatos son:

a) *Galvanómetros y amperímetros,* en los cuales se utilizan las acciones recíprocas entre un imán y una corriente;

b) *Los electrodinamómetros,* fundados en la acción electrodinámica que ejerce una corriente sobre otra corriente;

c) *Los amperímetros térmicos,* en los cuales un hilo se alarga a causa del calor producido por la corriente que lo recorre.

Galvanómetros.—Los galvanómetros están formados por un cuadro móvil recorrido por la corriente y que puede oscilar en un campo magnético alrededor de un eje perpendicular a la dirección del campo, o bien por una aguja imanada móvil en el interior de un cuadro recorrido por la corriente.

Galvanómetro de cuadro móvil. — El tipo de estos aparatos es el galvanómetro Deprez y d'Arsonval, que ya hemos descrito anteriormente (pág. 16).

Galvanómetro de imán móvil. — Consideremos un cuadro recorrido por una corriente: sabemos que da lugar a un campo dirigido perpendicularmente a su plano y cuyo valor en un punto fijo A es proporcional a la corriente que recorre el cuadro, es decir, que es de la forma:

$$\mathcal{H}_A = KI.$$

La constante K depende del número de espiras del cuadro, de la superficie de las espiras, de la posición del punto A respecto al cuadro y de su distancia a este cuadro.

Supongamos en este punto, que admitiremos que está en el eje del cuadro, una aguja imanada bastante pequeña para que el valor del campo sea aproximadamente el mismo en sus extremos y cualquiera que sea su orientación.

Esta aguja está sometida a dos pares: 1.º, el par debido al magnetismo terrestre, que tiende a orientarla en la dirección del meridiano magnético (véase tomo I, GENERALIDADES, pág. 113); 2.º, el par debido al cuadro, que tiende a colocarla paralelamente al campo que crea él mismo, es decir, perpendicular al cuadro. La aguja, solicitada de este modo, toma una posición de equilibrio determinada por la condición de que estos dos pares han de ser iguales. Supongamos que se

haya colocado el cuadro de tal modo que esté en el plano del meridiano magnético; cuando no lo recorre corriente alguna, la aguja está orientada paralelamente al plano del cuadro en la dirección MN. Cuando una corriente I pasa por el cuadro, la aguja gira un ángulo α y toma la posición $M'N'$ (figura 144). Sea G el valor del campo magnético terrestre y $\mathcal{A}$ el momento magnético de la aguja. El ángulo que forma la aguja con el campo terrestre es α; por consiguiente, el par debido al magnetismo terrestre será:

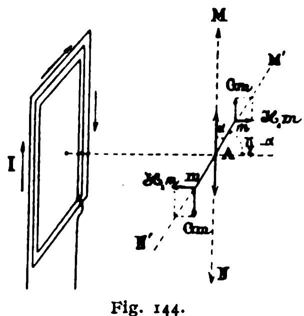


Fig. 144.

$$C_1 = G\mathcal{A} \operatorname{sen} \alpha \text{ [1]}.$$

La aguja forma con el campo creado por el cuadro un ángulo igual a $\frac{\pi}{2} - \alpha$, luego el par debido a este campo es:

$$C_2 = \mathcal{H}_A \mathcal{A} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)$$

o sea:

$$C_2 = \mathcal{H}_A \mathcal{A} \cos \alpha.$$

Pero como hemos visto que $\mathcal{H}_A = KI$, resulta:

$$C_2 = KI \mathcal{A} \cos \alpha.$$

Una vez conseguido el equilibrio de la aguja, se tiene $C_1 = C_2$, o sea:

$$G\mathcal{A} \operatorname{sen} \alpha = KI \mathcal{A} \cos \alpha$$

de donde

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{K}{G} I.$$

[1] Tomo I, GENERALIDADES, pág. 119.

Luego la aguja por efecto de la corriente I se desvía un ángulo cuya tangente trigonométrica es proporcional a la corriente. Si todo está dispuesto de modo que este ángulo sea bastante pequeño, se puede admitir que el ángulo es proporcional a la tangente.

Se puede hacer variar la constante $\frac{K}{G}$ para variar también la sensibilidad del aparato; para aumentarla, es decir, para tener una desviación más grande correspondiente a una misma corriente I, habrá que aumentar K o disminuir G. Para aumentar K basta acercar la aguja al cuadro; para disminuir G se coloca cerca de la aguja imanada otro imán cuyos polos estén dirigidos en sentido inverso a los de la aguja cuando está en reposo; la acción de la Tierra queda entonces disminuída por la del imán.

Hay muchos galvanómetros fundados en este principio, por lo cual no los describimos, pero con lo dicho basta para comprender perfectamente el funcionamiento de todos ellos. Uno de los más conocidos es el galvanómetro de Thomson, notable por su gran sensibilidad.

Amperímetros. — Son aparatos ya descritos en el primer tomo, remitiéndonos a lo dicho entonces sobre los mismos, así como también en lo que respecta a los amperímetros térmicos.

Electrodinamómetros. — Si se hace pasar por un sistema de dos carretes A y B cuyos planos sean perpendiculares entre sí, dos corrientes I, I', se ejercerán acciones recíprocas entre estos dos carretes (fig. 145).

En efecto, el carrete A crea un campo perpendicular al plano de sus espiras; el carrete B, por encontrarse en este campo, está sometido, como ya hemos

dicho (pág. 146), a un par que tiende a colocarlo perpendicularmente a la dirección del campo, es decir, paralelamente a A. Del mismo modo, el carrete B ejerce sobre A una acción que tiende a colocarlo paralelamente a su plano.

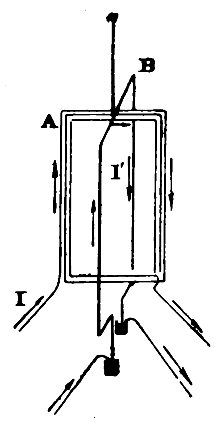


Fig. 145.

La acción recíproca entre estos dos carretes es proporcional al producto $I \times I'$. En efecto, sabemos que el campo creado por A al ser recorrido por I es proporcional a esta corriente y, por lo tanto, es de la forma:

$$\mathscr{H} = K_1 I.$$

Por otra parte, la acción del campo $\mathscr{H}$ sobre el cuadro recorrido por la corriente I' es proporcional al producto de este campo por la corriente. El par producido por la acción recíproca de estas dos corrientes es:

$$C = K_2 \mathscr{H} I'$$

o sea:

$$C = K_1 K_2 I I'$$

es decir:

$$C = K I I'.$$

Si uno de los dos cuadros, el A por ejemplo, es fijo y el otro móvil alrededor de un eje paralelo al plano de A, el cuadro B girará hasta que sea paralelo al A. Pero si el hilo de suspensión es un hilo de torsión que se tuerce por efecto del par C, desarrollará un par antagonista. C' proporcional al ángulo de torsión, es decir, de la forma:

$$C' = K' \alpha$$

siendo α el ángulo de torsión.

El cuadro toma, por consiguiente, una posición de equilibrio definida por la condición:

$$C = C'$$

o sea:

$$KII' = K'\alpha,$$

manteniéndose el cuadro B perpendicularmente al A por una torsión de ángulo y sentido convenientes.

De la relación anterior se deduce:

$$\alpha = \frac{K}{K'} II'.$$

Donde se ve que el ángulo de torsión es proporcional al producto de las dos corrientes.

Supongamos que todo esté dispuesto de modo que los dos cuadros sean recorridos por la misma corriente I; en este caso se tendrá:

$$\alpha = \frac{K}{K'} I^2.$$

El ángulo de torsión es, como se ve, proporcional al cuadrado de la corriente que atraviesa los dos cuadros, por lo cual se podrá con un aparato de esta clase medir la intensidad de la corriente; para ello bastará determinar la constante $\frac{K}{K'}$ del aparato haciendo que lo recorra una corriente I conocida.

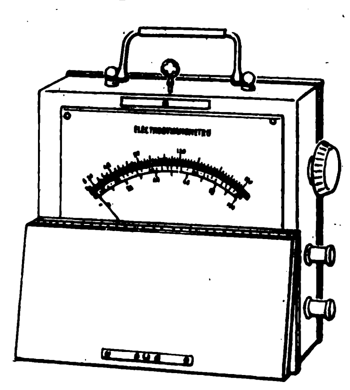


Fig. 146. — Electrodinamómetro de Carpentier.

Por otra parte, si la corriente se invierte, se invertirá a la vez en los dos cuadros, y la orientación

del carrete móvil será la misma. Este aparato puede servir, por consiguiente, para medir las corrientes alternas, de las cuales dará el valor eficaz.

La casa Carpentier construye electrodinamómetros de lectura directa, en los cuales la desviación del cuadro móvil es proporcional a la corriente que atraviesa los dos carretes, el fijo y el móvil (fig. 146).

Más adelante insistiremos en el estudio de estos aparatos.

II. — Método de medida

Entre todos los procedimientos que se pueden seguir para medir una intensidad, el más sencillo consiste en montar un galvanómetro en amperímetro (fig. 147). Se procede del modo siguiente: por medio de una pila Daniell patrón, se empieza por determinar, como ya sabemos (pág. 132), los valores de una resistencia en serie y en shunt, de modo que 1 volt entre sus bornes produzca una desviación de 100 divisiones de la escala. Cuando se obtienen estos valores *R* y *s*, se quita la pila tipo y se unen los bornes del galvanómetro así montado con los extremos de una pequeña resistencia *r* exactamente conocida y capaz de soportar la corriente que se trata de medir.

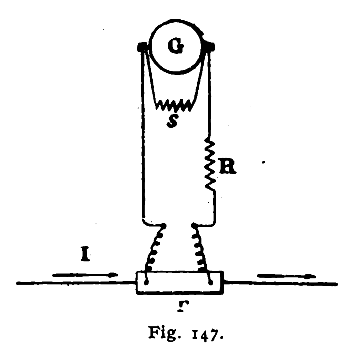


Fig. 147.

Se pone esta resistencia en el circuito recorrido por la corriente, y se lee la desviación de la imagen sobre la regla; esta desviación corresponde a una

tensión de u volts entre los extremos de r, teniéndose:

$$u = rI, \quad \text{de donde} \quad I = \frac{u}{r}.$$

Para graduar un amperímetro o comprobar sus indicaciones, se efectúa el montaje indicado por la figura 148: A es un amperímetro comprobado, Rh un reostato, y r una pequeña resistencia conocida. Se hace variar la intensidad de la corriente con el reostato, y se anota simultáneamente la indicación del amperímetro y de la desviación de la imagen luminosa del galvanómetro, que dará el valor de la intensidad de la corriente. Si es preciso, se traza, como en el caso del voltímetro, una curva de correcciones.

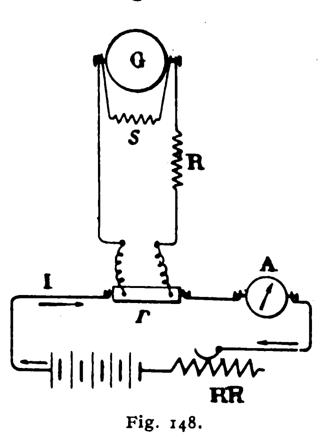


Fig. 148.

EJERCICIOS

1.° Estudio de la intensidad de la corriente necesaria para la fusión de los hilos

Esta intensidad depende: de la sustancia de que está hecho el hilo, de su diámetro, de su longitud, y de la clase de uniones en sus extremos.

Para hacer este estudio se emplean hilos delgados, que se fijan entre dos piezas; se unen, como se ve en la figura 149, a los bornes de una batería de acumuladores a través de dos reostatos y de un amperímetro. Uno de los reostatos es de topes y el otro está formado por un alam-

bre de maillechort sobre el cual puede hacerse mediante una pinza una toma de corriente en un punto cualquiera.

a) Se toman, por ejemplo, hilos de un solo metal o de una misma aleación, de igual longitud, pero de distinta sección, y se busca la intensidad necesaria para la fusión, disminuyendo progresivamente la resistencia de los reostatos. Antes de pasar de un valor a otro de la intensidad de la corriente, se espera medio minuto, aproximadamente.

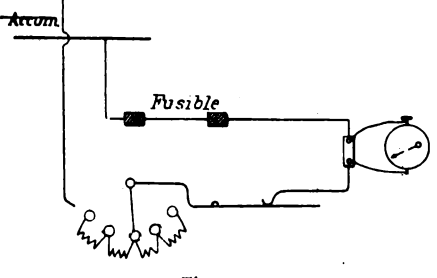


Fig. 149.

Se construye una curva cuyas abscisas sean los diámetros de los diferentes hilos, y las ordenadas los valores correspondientes de la corriente que ha producido su fusión.

b) Se toman varias longitudes de un mismo hilo y se repiten las mismas operaciones, construyéndose una curva cuyas abscisas sean los valores de las distintas longitudes, y las ordenadas las intensidades que han dado lugar a la fusión.

c) Montar sobre diferentes tipos de cortacírcuitos fusibles idénticos, y comprobar que se funden para intensidades diferentes.

2.º Comprobación de un amperímetro. — Curva de corrección

Si el amperímetro no es de shunts, se hace el montaje indicado por la figura 150. Se hace variar la intensidad de la corriente, ya sea variando el número de elementos de la batería de acumuladores o mediante un reostato; para cada valor de la corriente se anota la indicación del amperímetro I_1 y la desviación de la aguja del galvanómetro, cuyas resistencias en serie R y en shunt s son tales

que 1 volt produce una desviación de 100 divisiones. El valor exacto de la corriente es I_2, tal que:

$$rI_2 = \frac{n}{100},$$

siendo n el número de divisiones leído sobre la regla. De esta igualdad se deduce inmediatamente, dividiendo por r, el valor de I_2:

$$I_2 = \frac{n}{100r}.$$

Se forma una tabla que dé las indicaciones I_1 del amperímetro y de los valores exactos de la corriente I_2 que les corresponden.

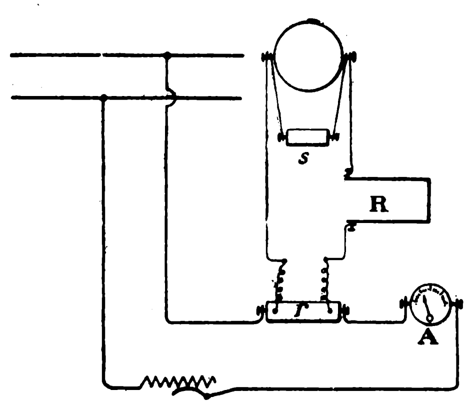


Fig. 150.

Se traza una curva de corrección que tenga por abscisas las indicaciones del amperímetro y por ordenadas las diferencias correspondientes entre I_1 e I_2, tomadas en un sentido si deben sumarse a las indicaciones del amperímetro, y en sentido contrario si deben restarse.

Si el amperímetro es de shunts de resistencias conocidas, y si no se dispone de ninguna resistencia conocida del mismo orden de magnitud y susceptible de ser atravesada por la corriente que debe indicar el amperímetro, se

efectúa el montaje indicado en la figura 151. Se colocan dos horquillas en las cápsulas 1-3 y 2-4 y se lee la desviación n; la tensión en los dos extremos del shunt

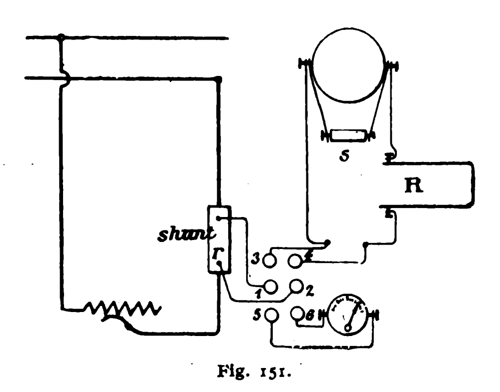


Fig. 151.

es $\frac{n}{100}$ volts, el cual es atravesado, por lo tanto, por la corriente I tal que:

$$rI = \frac{n}{100}, \quad \text{de donde} \quad I = \frac{n}{100r}.$$

Después se colocan las horquillas en las posiciones 1-5 y 2-6, y el amperímetro indicará n' divisiones, correspondientes a una corriente indicada I'. Se comparan entre sí I con I'.

CAPÍTULO VIII

Potenciómetros

En la medida de las f. e. m. por el método de oposición, dispositivo de Bouty, hemos visto que la diferencia de potencial entre los bornes de la caja *A* (figura 152) a la cual se opone la f. e. m. que se mide, es proporcional a la resistencia introducida en esta caja, ya que la corriente que la atraviesa es constante.

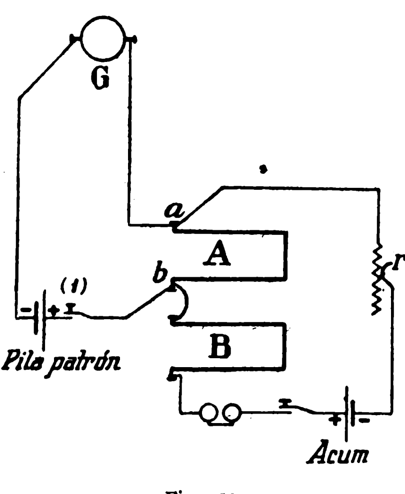


Fig. 152.

El factor de proporcionalidad se determina por medio de una pila tipo, y nunca es, en general, un número simple.

Se puede regular la corriente que recorre las resistencias de esta caja, de modo que este factor sea un número simple, es decir, que para una resistencia de 1 ohm tomada en esta caja, haya entre sus extremos una diferencia de potencial

que sea una fracción simple de volt. En estas condiciones, a cada valor de la resistencia tomada en la caja corresponderá entre sus bornes una tensión que se deduce rápidamente del valor de esta resistencia. Así se tiene un potenciómetro; se ve por consiguiente, que el potenciómetro obra como un voltímetro de cero en el respecto de que todas las operaciones tienden a llevar al galvanómetro a la posición de reposo, es decir, al cero. Este aparato es una verdadera balanza de volts, y agregando shunts convenientes, se puede hacer una balanza de amperes y de ohms.

Formación de un potenciómetro con cajas de resistencia. — Se puede construir un potenciómetro mediante dos cajas *A* y *B* de 11 110 ohms que formen con una resistencia regulable *r*, cuyo valor no importa conocer, un circuito por el que pasa la corriente de uno o dos acumuladores cuya fuerza electromotriz permanece constante mientras dura la medida. (Estos acumuladores deberán haber estado funcionando algún tiempo después de cargados.)

Para que la corriente permanezca constante en el circuito, se quitan todas las clavijas de *A*, se dejan en su sitio todas las de *B*, y en las medidas no se hace más que transportar las clavijas de una de las cajas a los alojamientos correspondientes de la otra, con lo cual la resistencia total de las dos cajas queda siempre igual a 11 110 ohms.

Regulación. — Vamos a regular el circuito de modo que entre los bornes *a*, *b* de *A* haya para cada ohm tomado en esta caja una diferencia de potencial de $^1/_{6000}$ de volt, por ejemplo.

Para ello se toma entre *a* y *b*, en oposición con la diferencia de potencial existente entre estos dos

puntos, un elemento tipo, de Weston por ejemplo ($E = 1{,}0183$), a través de un galvanómetro (fig. 152).

Puesto que entre *a* y *b* se quiere tener 1 : 6000 de volt por ohm, para obtener 1,0183 volts será precisa una resistencia ρ tal que:

$$\rho \times \frac{1}{6000} = 1{,}0183$$

de donde:

$$\rho = 6000 \times 1{,}0183 = 6110 \text{ ohms.}$$

Por lo tanto, se toma sobre la caja *A*, 6110 ohms (en la caja *B* habrá por consiguiente 5000 ohms), y se hace variar *r* hasta que el galvanómetro quede en equilibrio. En estas condiciones, se tendrán evidentemente 1 : 6000 de volt por ohm entre los bornes *a* y *b*.

OBSERVACIÓN I. — Se puede calcular un valor aproximado de *r*, con lo cual se evitan los tanteos y se logran inmediatamente condiciones tales que el elemento tipo no dé una corriente perjudicial. El cálculo se puede efectuar fácilmente del modo que sigue: la corriente *i* en las cajas debe ser tal que entre los extremos de un ohm se tenga 1 : 6000 de volt, es decir, $i = \frac{1}{6000}$ de ampere. Como la f. e. m. es aproximadamente igual a 2 volts y la resistencia de las cajas es de 11110 ohms, el valor de *r* debe ser tal que se tenga:

$$\frac{2}{11110 + r} = \frac{1}{6000},$$

de donde:

$$r = 12000 - 11110 = 890 \text{ ohms.}$$

Claro está que una pequeña variación en el valor de la fuerza electromotriz del acumulador modifica

considerablemente esta resistencia de regulación. En efecto, si esta f. e. m. fuera de 1,9 se tendría:

$$\frac{1,9}{11\,110 \times r} = \frac{1}{6000}$$

de donde:

$$r = 11\,400 - 11\,110 = 290 \text{ ohms},$$

y si fuera de 2,1 volts, r debería tener por valor:

$$2,1 \times 6000 - 11\,110 = 14900 \text{ ohms}.$$

Así se ve la gran importancia que tiene la fijeza o constancia de la fuerza electromotriz del acumulador durante una medida, y los límites tan amplios entre que ha de poder variar la resistencia de regulación r.

OBSERVACIÓN II. — Se podría hacer la regulación de modo que se obtuviera por cada ohm de la caja A una diferencia de potencial más elevada, para lo cual bastaría colocar varios acumuladores en el circuito. Pero hay un límite, impuesto por la corriente máxima que pueden soportar las resistencias conocidas; esta corriente es en general de 0,001 de ampere, y, por lo tanto, la tensión total máxima que se puede obtener entre a y b es:

$$11\,110 \times 0,001 = 11,1 \text{ volts}.$$

Este resultado se consigue con seis acumuladores.

De lo dicho se deduce que entre a y b se pueden obtener todos los valores comprendidos entre 1 y 10 volts.

Medida de una fuerza electromotriz o de una diferencia de potencial. —La f. e. m. o la d. d. p. que se quiere medir está colocada en el sitio de la pila patrón (figura 152). Sin tocar a la resistencia r, se hace variar la resistencia de la caja A, como ya hemos dicho, hasta

que al cerrar la llave (1) el galvanómetro no experimente ninguna desviación. Sea R_1 la resistencia obtenida; si la regulación se ha hecho de modo que se obtenga 1 : 6000 de volt por ohm, la tensión que se mide tiene por valor $\frac{R_1}{6000}$ de volt.

Graduación de un voltímetro. — Para graduar un voltímetro basta aplicar entre sus bornes una serie de diferencias de potencial convenientemente tomadas, que se miden con el potenciómetro, como hemos dicho anteriormente. Por una parte se obtendrá la indicación del voltímetro, y por otra el valor exacto de la tensión aplicada, pudiéndose así efectuar una graduación o una corrección. Pero según la observación II del párrafo anterior al precedente, esta operación únicamente podrá efectuarse para tensiones comprendidas entre 0 y 10 volts; para tensiones superiores habrá que completar el dispositivo anterior del siguiente modo:

1.º *Voltímetro para una tensión máxima que no pase de 10 volts.* — Supongamos que hay que comprobar un voltímetro para 3 volts, por ejemplo. Se empieza por regular el potenciómetro de modo que se obtenga entre *a* y *b* 1 : 3000 de volt por ohm (el circuito comprenderá dos acumuladores). El montaje es el indicado por la figura 153; *Rh* es un reostato por el cual pasa la corriente de los acumuladores; con un contacto *P* se pueden obtener entre *M* y *P* tensiones que varían entre 0 y 4 volts; *V* es el voltímetro sometido a la comprobación. Estando colocado el cursor *P* en un punto para el cual la aguja del galvanómetro se encuentra sobre una división determinada de su escala, se regula la resistencia de *A* para que el galvanómetro quede en equilibrio cuando se baje la llave (1); sea R_1 esta resis-

tencia. La d. d. p. entre M y P, es decir, la aplicada entre los bornes del voltímetro, es $R_1 \frac{1}{3000}$ volts.

Corriendo poco a poco el cursor P a lo largo de R, podrá determinar para cada indicación del voltímetro el valor exacto de la tensión aplicada.

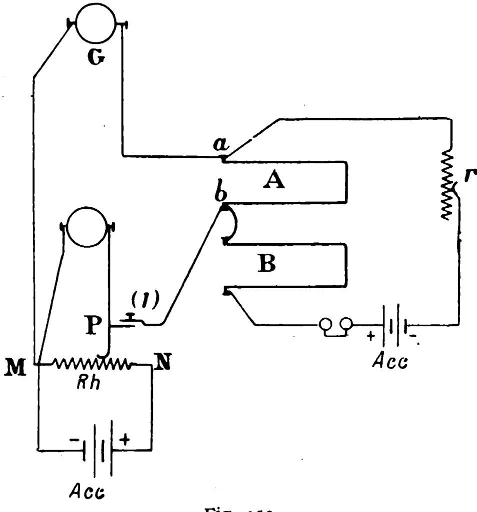


Fig. 153.

2.° *Voltímetro para una tensión superior a 10 volts.* — Se mide con el potenciómetro una fracción determinada de la tensión aplicada en los bornes del voltímetro, fracción cuyo valor es inferior a 10 volts. Para ello se hace el montaje indicado por la figura 154.

Por el reostato Rh pasa la corriente de un generador que da una diferencia de potencial igual por lo menos a la tensión máxima que debe indicar el voltímetro.

Supongamos, por ejemplo, que esta tensión máxima sea 100 volts; r_1 y r_2 son dos resistencias cuya

suma es 10 000 ohms, por ejemplo: $r_1 = 300$ ohms, y $r_2 = 9700$ ohms.

Si entre M y P hay u volts, la corriente en las resistencias r_1 y r_2, es $i = \frac{u}{10000}$ y entre los extremos de r_2 hay una d. d. p. $u' = 300 \frac{u}{10000}$ ó sea $\frac{3u}{100}$ volts. Por consiguiente, si u varía de 0 a 100 volts, u' varía

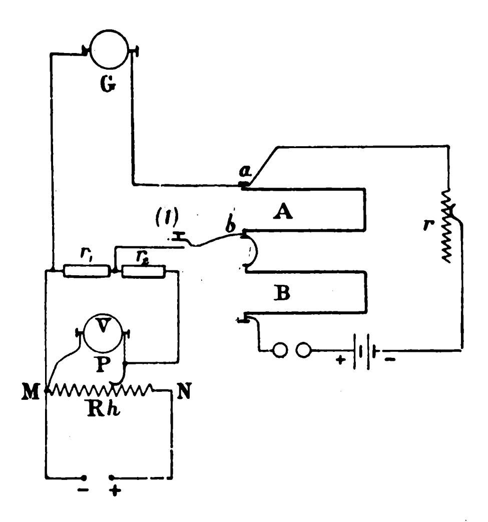


Fig. 154.

entre 0 y 3 volts, y esta tensión se podrá medir con el potenciómetro, como ya hemos dicho.

Sea R la resistencia de la caja A para la cual el galvanómetro no acusa la menor desviación cuando se baja la llave (1); la diferencia de potencial entre a y b será: $u' = R \frac{1}{3000}$ (si el potenciómetro se ha regulado de modo que haya $^1/_{3000}$ de volt por ohm, entre a y b).

La diferencia de potencial u entre M y P, es decir, la aplicada en los bornes del voltímetro, es tal que:

$$u' = 300 \frac{u}{10000}$$

de donde

$$u = \frac{u' \times 10000}{300}$$

o sea:

$$u = \frac{R}{3000} = \frac{u' \times 10000}{300} = \frac{R}{90}.$$

Graduación de un amperímetro. — Se hace el montaje indicado por la figura 155. *Am* es el amperímetro

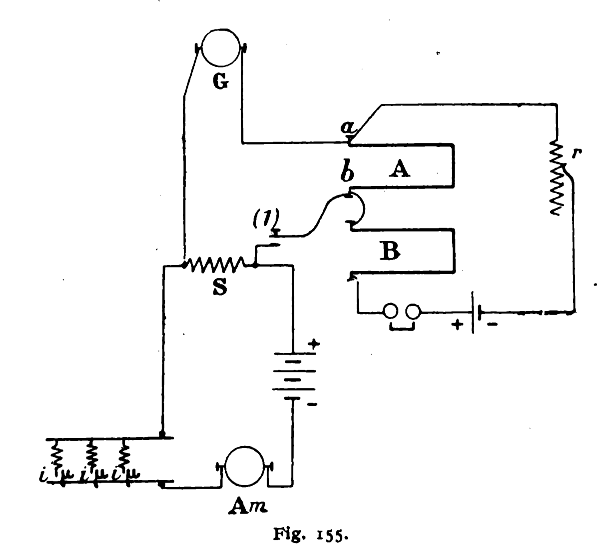


Fig. 155.

que se trata de graduar; S una pequeña resistencia conocida. Se cierran sucesivamente los interruptores i, de modo que se obtengan distintas indicaciones en el

amperímetro, y se mide, como antes, la diferencia de potencial entre los extremos de S.

Supongamos, por ejemplo, que el valor de S sea 0,1 de ohm, y que el potenciómetro se haya regulado para $^1/_{3000}$ de volt por ohm. Sea R la resistencia de A para la cual el galvanómetro no se desvía cuando se cierra la llave (1); la tensión entre los extremos de S es $\frac{R}{3000}$ volts, y la corriente I en S será tal que:

$$I \times \frac{1}{10} = \frac{R}{3000}$$

de donde:

$$I = \frac{R \times 10}{3000} = \frac{R}{300}.$$

Se compara este valor con el dado por el amperímetro.

Potenciómetros Carpentier y Chauvin-Arnoux

Estos aparatos, que tienden a generalizarse cada vez más en la industria, constituyen por sí solos verdaderos *laboratorios*, con los cuales se pueden graduar voltímetros, amperímetros, cajas de resistencia, etc., etc.

Varios constructores han lanzado al mercado aparatos de esta clase, fundados en los principios que acabamos de exponer; pero nos limitaremos a describir los de Carpentier y Chauvin-Arnoux.

Potenciómetro de Carpentier. — Este aparato está representado esquemáticamente en la figura 156. Con un inversor se puede colocar una resistencia de 10 000 ohms en la posición A ó en la posición A'. En B se ve un conmutador que tiene dos escobillas que pueden resbalar sobre los topes correspondientes a once

carretes de 1000 ohms, de modo que siempre hay comprendidos entre las dos escobillas dos de estos carretes, es decir, una resistencia de 2000 ohms. Estas escobillas están unidas entre sí por una resistencia también de 2000 ohms, dividida en diez carretes de 200 ohms. *C* es un conmutador con otras dos escobillas

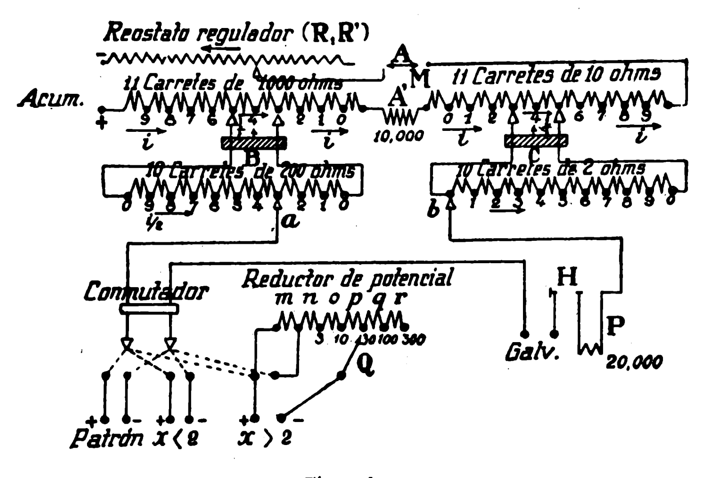


Fig. 156.

que se pueden correr sobre los topes correspondientes a once carretes de 10 ohms, de modo que siempre haya entre ambas dos de estos carretes, o sea una resistencia de 20 ohms.

Estas dos escobillas están unidas entre sí por una resistencia de 20 ohms, dividida en diez carretes de 2 ohms. Las escobillas *a* y *b* pueden resbalar respectivamente sobre los topes correspondientes a los carretes de 200 ohms y sobre los que corresponden a los diez carretes de 2 ohms; estas dos escobillas pueden unirse, a través de un galvanómetro, con los polos de un elemento que esté en estudio, o con dos puntos

entre los cuales haya una diferencia de potencial que se trate de medir, inferior a 2 volts, o también con los dos extremos de un devanado de un reductor de potencial cuyos puntos extremos estén unidos a bornes entre los cuales haya una diferencia de potencial medida superior a 2 volts. Estas uniones se pueden hacer mediante un conmutador.

La llave *H* del galvanómetro está dispuesta de modo que cuando no está bajada, el galvanómetro está en cortocircuito; si se baja la llave de modo que se establezca un primer contacto, el circuito del galvanómetro se cierra sobre una resistencia de protección de 20000 ohms, y esta resistencia queda en cortocircuito cuando se sigue bajando la llave para establecer un segundo contacto.

Regulación. — Se empieza por colocar los cursores *B*, *a*, *C* y *b* de modo que sus índices estén respectivamente frente a los números 4, 3, 4, 0; después se regula el reostato de regulación de modo que estando el conmutador sobre los polos de una pila tipo Latimer, la aguja del galvanómetro no se desvíe al bajar la llave *H*. Sea entonces i la corriente dada por las pilas auxiliares o por los dos acumuladores; como entre los cursores de *B* hay dos resistencias iguales, de 2000 ohms, los carretes de 200 ohms sobre los topes que recorre *a* serán atravesados por la corriente $\frac{i}{2}$, de modo que la d. d. p. entre *a* y *b* para las posiciones dadas tienen por valor

$$600 \times \frac{i}{2} + (4000 + 10000 + 40)i;$$

o sea:

$$(10000 + 4000 + 300 + 40)i = 14340\, i;$$

por consiguiente, cuando se consigue el equilibrio del galvanómetro, se tiene:

$$14340i = 1{,}434,$$

de donde:

$$i = \frac{1{,}434}{14340} = \frac{1}{10000} \text{ de ampere.}$$

Medida de una fuerza electromotriz inferior a 2 volts. —Se pone el inversor sobre los bornes correspondientes. Sin tocar al reostato de regulación, se corren convenientemente los cursores de modo que se obtenga el equilibrio del galvanómetro. Supongamos que el índice de *B* esté frente al 6, el de *a* frente al 3, el de *C* frente al 2, y el de *b* frente al 5.

La corriente en los carretes de 1000 y en los de 10 ohms, es 0,0001 de ampere; en los carretes de 200 y de 2, la corriente es de $^1/_{20000}$; la d. d. p. entre *a* y *b* es, por consiguiente:

$$60 \times \frac{1}{20000} + (6000 + 10000 + 20) \frac{1}{10000} + 10 \times \frac{1}{20000} \text{ volts}$$

o sea:

$$(300 + 6000 + 10000 + 20 + 5) \frac{1}{10000} =$$

$$= 16325 \times \frac{1}{10000} = 1{,}6325 \text{ volts.}$$

OBSERVACIÓN. — Si la fuerza electromotriz es inferior a 1 volt, se lleva, mediante un conmutador, el carrete de 10 000 ohms de *A'* a *A*.

Medida de una tensión superior a 2 volts. — El reductor de potencial está formado de seis resistencias, *m*, *n*, *o*, *p*, *q* *r*, cuyos valores respectivos son: 1 000, 2 000, 7 000, 20 000, 70 000 y 200 000 ohms. Se unen

a los bornes X los dos puntos entre los cuales existe la d. d. p. que se mide y el conmutador se dispone entre

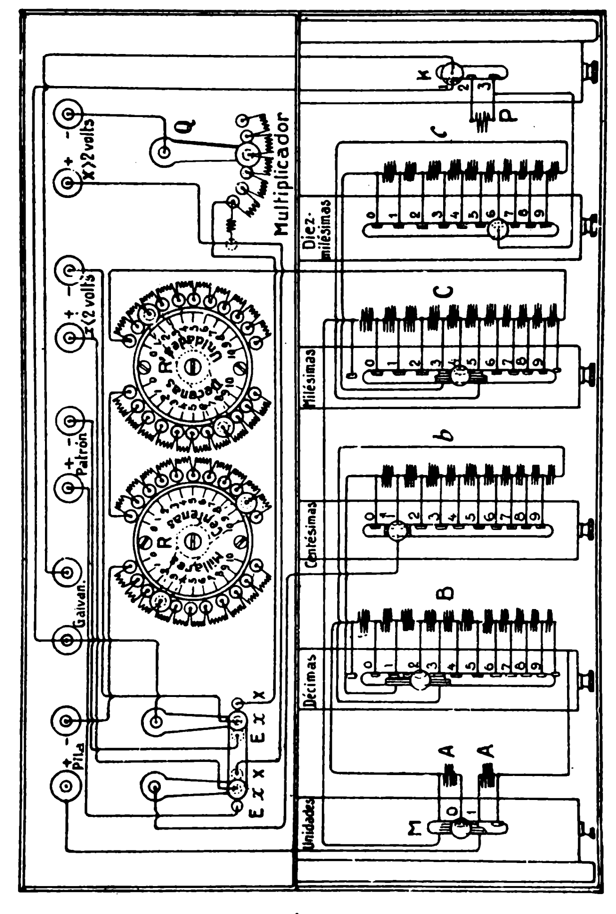


Fig. 157.

los extremos de la resistencia m. Supongamos que la maneta del reductor esté sobre el tope marcado 30, común a las resistencias p y q. Si la tensión medida

es X, la corriente en las resistencias del reductor será:

$$i = \frac{X}{p+o+n+m} = \frac{X}{20000+7000+2000+1000} = \frac{X}{30000}$$

y la diferencia de potencial entre los extremos de la resistencia m será:

$$\frac{X}{30000} \times 1000 = \frac{X}{30}.$$

Por consiguiente, para obtener el valor de la tensión medida habrá que multiplicar por 30 el obtenido del modo indicado anteriormente, cuando el equilibrio

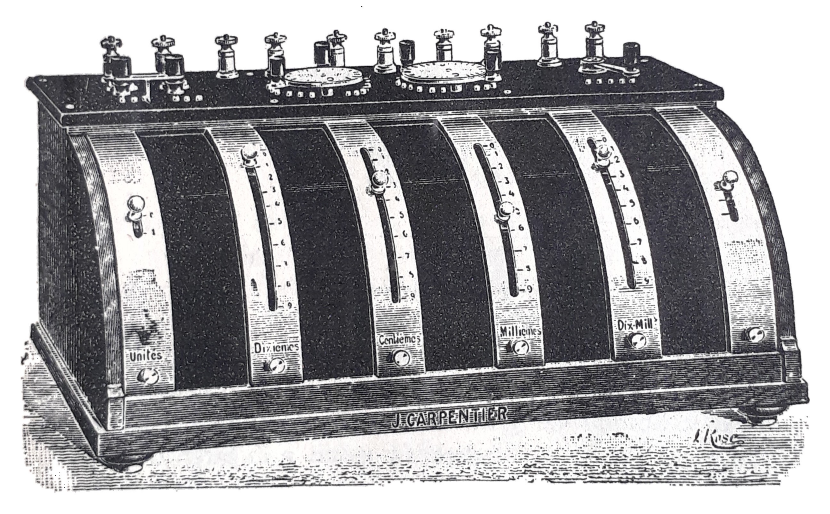


Fig. 158. — Potenciómetro de Carpentier.

del galvanómetro se consigue corriendo los cursores. En general, se obtiene la tensión multiplicando el valor encontrado por el número escrito frente al tope sobre el cual se halla la maneta del reductor.

Medida de intensidades y de resistencias. — Se comprende fácilmente que con shunts apropiados se puede,

como ya hemos dicho, medir intensidades de corriente y resistencias. La disposición de los carretes y de las diferentes partes que componen el aparato es la representada por las figuras 157 y 158.

Potenciómetro Chauvin Arnoux.—Este aparato está representado en las figuras 159 y 160; *F* es un hilo

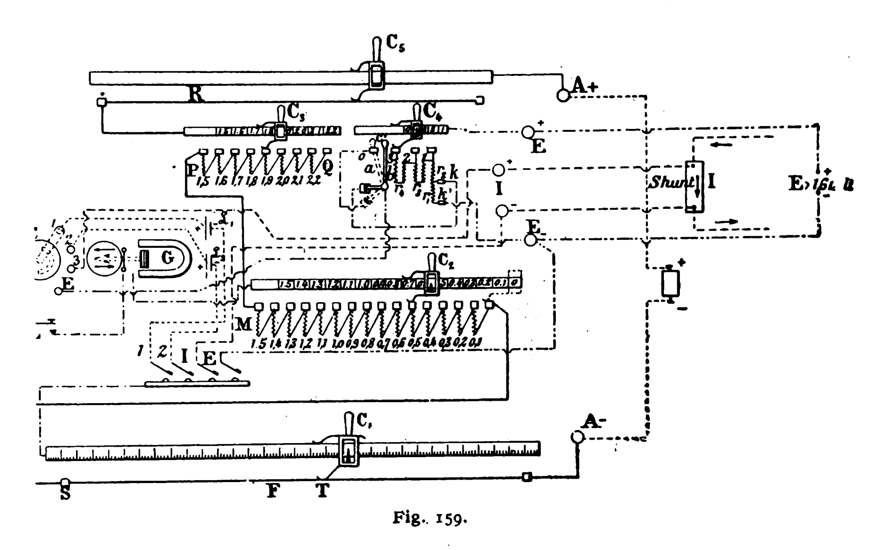


Fig. 159.

bien calibrado de gran resistividad sobre el cual se corre un cursor con índice C_1 móvil a lo largo de una regla graduada dividida en mil partes iguales. Esta regla tiene en su cara anterior una escala de compensación en grados centígrados, a la cual corresponde otro índice grabado sobre la otra cara del cursor y que basta poner frente al número de grados correspondiente al leído sobre el termómetro de la pila tipo para que las diferencias debidas a la temperatura se corrijan directamente.

MN son quince resistencias, cada una de las cuales

es igual a la del hilo F. Un cursor C_2 lleva dos contactos, uno de los cuales se apoya sobre los topes a que van fijadas las resistencias, y el otro sobre la regla; cuando el cursor inferior se encuentra sobre uno de

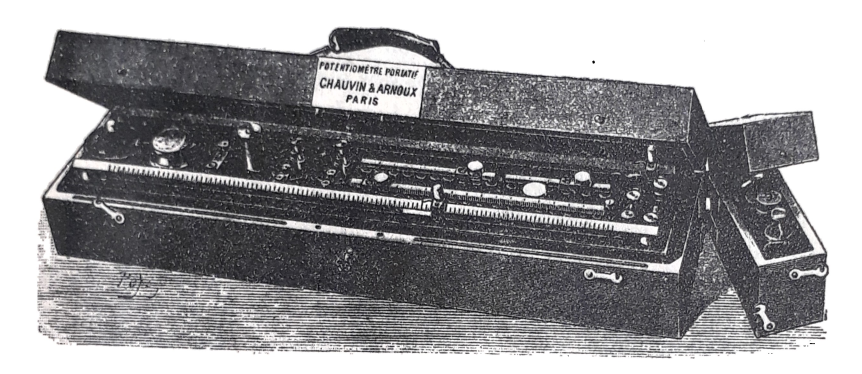


Fig. 160. — Potenciómetro Chauvin-Arnoux.

los topes, el índice de C_2 está frente a un número igual al número de orden de este tope, dividido por 10; los números indicados sobre esta regla son, por lo tanto: 0,0; 0,1; 0,2...; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5.

$P\ Q$ es un grupo de siete resistencias idénticas a las anteriores; los dos contactos de un cursor C_3 pueden poner en comunicación uno cualquiera de los topes a que van fijadas estas resistencias con una regla que, como la anterior, lleva indicaciones que varían de 1,5 a 2,2. R es un reostato lineal, del cual puede unirse un punto cualquiera con una regla no graduada, por medio de un cursor C_5.

Hechas las conexiones del modo que indica la figura, se ve que el acumulador de taraje está cerrado sobre un circuito que comprende: la parte del hilo del reostato que hay entre el cursor C_5 y el extremo izquierdo del hilo, la parte de las resistencias $P\ Q$ que hay entre

C_3 y P, todas las resistencias MN y el hilo F. Por lo tanto, se puede variar la resistencia de este circuito por medio de los dos cursores C_3 y C_5.

C es un conmutador de platillo giratorio y pulsador, con el cual se pueden unir sucesivamente los dos cursores C_1 y C_2, a través del galvanómetro G y de los interruptores 1, 2, I, E y L, uno de los dos elementos tipos Latimer L_1 y L_2, o los bornes I ($+I$ y $-I$), o los dos extremos K y K' de una resistencia r_1.

En todas las operaciones siguientes hay que tener muy en cuenta la indicación de los polos que lleva el aparato.

Taraje o tarado. — Se lee sobre el termómetro del patrón L_1 su temperatura, y se coloca el índice correspondiente de C_1 frente al número de grados leídos sobre el termómetro; C_3 se coloca sobre el tope 1,9; C_5 en el extremo de la izquierda de la regla y C_2 sobre el tope 1,4. Se coloca el pulsador del conmutador en la posición 1 correspondiente al patrón L_1; se aprieta el botón durante un tiempo muy corto, y se observa el sentido de la desviación de la aguja del galvanómetro. Entonces se corre C_3 al tope siguiente en el sentido indicado por la flecha hacia la cual se mueve la aguja, se aprieta otra vez el botón, y se observa el sentido de la desviación de la aguja. Cuando el avance de un tope es demasiado grande, se mueve el cursor C_5 hasta que se obtenga el equilibrio del galvanómetro.

Supongamos, por ejemplo, que la temperatura sea 20°; se sabe que el elemento Latimer tiene una fuerza electromotriz dada por la relación:

$$E = 1{,}4342\ [1 - 0{,}00077\ (20 - 15)] = 1{,}4287 \text{ volts.}$$

Estando colocado el índice frente a los 20°, la longitud ST será igual a 287 divisiones; sea, pues, r la

resistencia del hilo F; la resistencia comprendida entre S y T será:

$$\frac{r \times 287}{1000};$$

cada resistencia del grupo MN es igual a r, de modo que si el cursor C_2 está sobre el tope marcado con 1,4, la resistencia comprendida entre C_2 y N es igual a 14 r, y la comprendida entre C_2 y C_1 será $14\,r + \frac{287}{1000}\,r$. Si la corriente que pasa por el circuito sobre el cual está cerrado el acumulador de tara es i, la diferencia de potencial entre C_2 y C_1 es:

$$14\,r + \left(\frac{287}{1000}\,r\right)i, \qquad \text{o sea} \qquad 14{,}287 \times ri;$$

y como la aguja del galvanómetro no experimenta desviación alguna cuando entre estos dos cursores se deriva un elemento tipo cuya f. e. m. es 1,4287 volts, se tendrá:

$$14{,}287 \times ri = 1{,}4287,$$

de donde

$$ri = \frac{1{,}4287}{14{,}287} = 0{,}1 \text{ volt},$$

y la corriente en el circuito sobre el cual está cerrado el acumulador será:

$$i = \frac{0{,}1}{r} \text{ de ampere.}$$

Medida de una fuerza electromotriz o de una diferencia de potencial. — 1.° La tensión es superior a 1,6 volts. — Los dos puntos entre los cuales existe la tensión x medida están unidos a los bornes E y — E, estando así cerrados sobre un circuito de resistencia

100000 ó 10000 ó 1000 ohms, según que el contacto del cursor C_4 esté sobre los topes 3, 2 ó 1 ($r_4 = 90000$, $r_3 = 9000$, $r_2 = 900$, $r_1 = 100$). La corriente en el circuito es $\frac{x}{100000}$ ó $\frac{x}{10000}$ ó $\frac{x}{1000}$, y la diferencia de potencial entre los extremos K y K' de la resistencia $r_1 = 100$ será:

$$\frac{x}{100000} \times 100 = \frac{x}{1000}.$$

o sea:

$$\frac{x}{10000} \times 100 = \frac{x}{100} \quad \text{o} \quad \frac{x}{1000} \times 100 = \frac{x}{10}.$$

Los puntos K y K' están unidos por los interruptores E y L con el galvanómetro.

Sin tocar a los cursores C_3 y C_5, cuyas posiciones han sido determinadas por el tarado anterior, se lleva el pulsador del conmutador C frente a E, se aprieta el pulsador y se observa el sentido de la desviación de la aguja del galvanómetro. La flecha hacia la cual se mueve la aguja indica el sentido del movimiento de los cursores C_1 y C_2 necesario para obtener el equilibrio. Supongamos, por ejemplo, que C_1 esté sobre la división 625 y C_2 sobre el séptimo tope, es decir, sobre el tope marcado con 0,7.

La resistencia comprendida entre C_1 y C_2 es

$$\frac{r \times 625}{1000} + 7r,$$

y la corriente es $\frac{0,1}{r}$ de ampere; luego la diferencia de potencial entre estos dos puntos, y por consiguiente entre K y K', es:

$$\left(\frac{r \times 625}{1000} + 7r\right)\frac{0,1}{r} \quad \text{o} \quad 7,625 \times 0,1 = 0,7625.$$

Si el cursor C_4 está sobre el tope marcado con el 2, se tendrá, según lo dicho:

$$\frac{x}{100} = 0{,}7625, \quad x = 76{,}25 \text{ volts.}$$

De un modo general, se obtendrá el valor de la tensión medida escribiendo a continuación de los números sobre que se encuentra el cursor C_2 los que están en la regla frente al índice del cursor C_1, de tal modo que la última de estas cifras ocupe el lugar de los diezmilímetros, y se corre la coma uno, dos o tres lugares a la derecha según que el cursor C_4 esté sobre los topes 1, 2 ó 3.

2.º La tensión es inferior a 1,6 volts. — Se coloca el cursor C_4 sobre el tope *O*, y entonces el conmutador *C'* que ocupaba la posición *b*, bascula y pasa a ocupar la posición *a*. En estas condiciones, los puntos entre los cuales existe la tensión medida están unidos directamente a través de un galvanómetro, y para la misma posición anterior del conmutador *C'*, entre los cursores C_1 y C_2. Se procede como en el caso de antes, y el número obtenido de la manera que hemos dicho, sin correr la coma, dará el valor de la tensión que se ha medido.

Medida de intensidades. — La corriente que se mide atraviesa un shunt de resistencia perfectamente conocida *R*, cuyos extremos están unidos a los dos bornes 1 y — 1. Se coloca el pulsador de *C* frente a *I*, se aprieta este botón, y se procede como para el caso de una tensión. De este modo se obtiene el valor de *R I*, del cual se deduce el de la corriente *I*.

EJERCICIOS

1.º Montar un potenciómetro con dos cajas de resistencias, emplear como pila tipo un elemento Daniell de f. e. m.

1,10 volt y regular de modo que se obtenga $^1/_{6000}$ de volt por ohm. Medir de este modo las fuerzas electromotrices de varios elementos (figura 152).

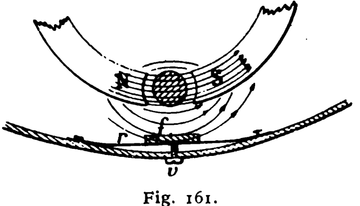


Fig. 161.

2.º Regular el potenciómetro de modo que se obtenga $^1/_{3000}$ de volt por ohm y medir la f. e. m. de dos elementos del ejemplo anterior, comparando los resultados.

3.º Graduar un voltímetro Chauvin-Arnoux para la sensibilidad 3 (fig. 153). Construir del modo que se indicó en el ejercicio de la página 143 la curva de corrección.

Regular el voltímetro de modo que se consiga la exactitud de su indicación para una posición dada de la aguja, hacia el medio de la escala. Para ello, el imán *NS* del voltímetro se shunta con una hoja de hierro *f* fijada sobre un muelle *r* y que se puede acercar o alejar del imán, mediante

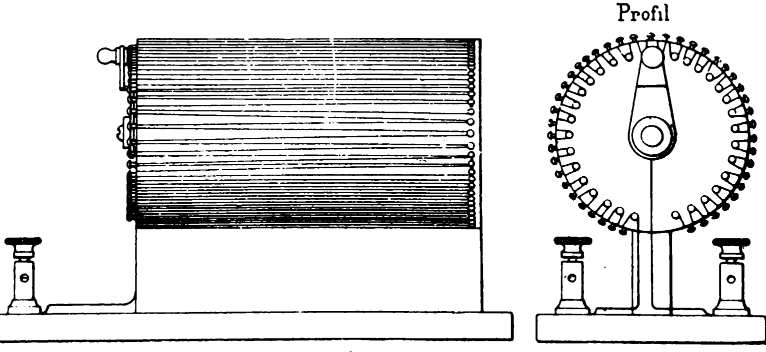


Fig. 162.

un tornillo (fig. 161). Si se acerca, el número de líneas de fuerza desviadas por el hierro aumenta, el flujo a través del cuadro disminuye, de modo que para una misma corriente en el cuadro, la desviación es menor; al contrario, si se aleja, para una misma tensión aplicada en los bornes del voltímetro la desviación es mayor.

4.° Hecha esta regulación, comprobar el voltímetro para tensiones más elevadas (montaje de la figura 154) y construir, si es preciso, una curva de corrección.

5.° Comprobar un amperímetro Chauvin-Arnoux (mon-

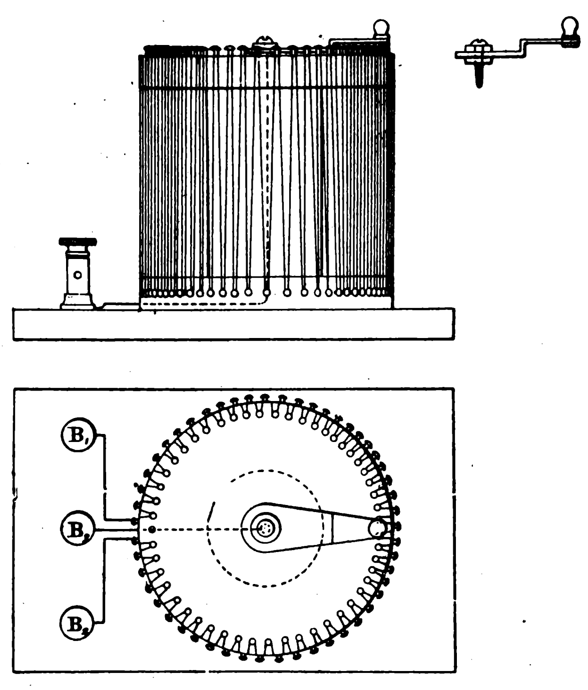


Fig. 163.

taje de la figura 155), regularlo para un valor dado, y construir, si es preciso, la curva de regulación para toda la extensión de la escala.

OBSERVACIÓN. — Para estas últimas medidas resulta cómodo construir reostatos *r* y *R*, de una de las formas indicadas por las figuras 162 y 163.

CAPÍTULO IX

Medida de potencias. — Medida de energía (corriente continua)

I. Potencia

Se trata de medir la potencia empleada en un circuito de utilización C. Para ello puede hacerse uso del amperímetro A atravesado por la corriente que alimenta al circuito y de un voltímetro V derivado entre sus extremos. Si I amperes y U volts son las indicaciones de estos dos instrumentos, la potencia absorbida por el circuito de utilización es UI watts.

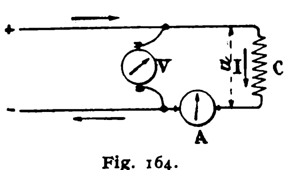


Fig. 164.

El voltímetro y el amperímetro deben estar derivados sucesivamente y no al mismo tiempo, porque de hacerlo de este último modo, el producto UI no daría exactamente la potencia que se quiere medir.

En efecto, supongamos que estos aparatos están dispuestos como se ve en la figura 164. El amperímetro de resistencia r es atravesado por la corriente I, produciéndose una caída de tensión rI, y el voltímetro indicará $u' = u + rI$, de modo que la potencia obtenida $u' \times I$ tiene por valor:

$$(u + rI)I \qquad \text{o sea} \qquad uI + rI^2.$$

Por consiguiente, se comete un error igual a $r I^2$, que es la potencia gastada en el amperímetro.

Si los aparatos estuvieran dispuestos como indica la figura 165, el voltímetro sería recorrido por una corriente i, el amperímetro A indicaría $I + i$, el voltímetro daría la diferencia de potencial U, y el producto de estas dos indicaciones sería:

$$u(I + i) = uI + ui.$$

Es decir, que se cometería un error igual a $u\,i$, potencia absorbida por el voltímetro.

Es evidente que la resistencia r del amperímetro y la corriente i en el voltímetro tienen valores muy pequeños. Se ve fácilmente que si se emplean al mismo tiempo estos dos instrumentos resulta ventajosa la disposición de la figura 164 si la corriente es pequeña y la tensión elevada, mientras que debe preferirse la de la figura 165 si la corriente es alta y la tensión pequeña.

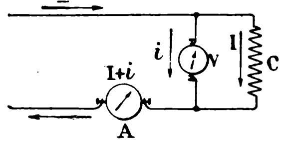


Fig. 165.

Wattímetros. — Los wattímetros son aparatos que sirven para medir directamente la potencia tomada por un circuito de utilización. Hay *wattímetros electrodinámicos* y *wattímetros térmicos*.

Wattímetros electrodinámicos. — Estos instrumentos están construídos como los electrodinamómetros descritos anteriormente (pág. 148). Un carrete fijo de hilo grueso $B\ B'$ está intercalado en serie en el circuito que utiliza la potencia que se mide, y por consiguiente es atravesado por la misma corriente I que este circuito. Un cuadro de hilo fino F, montado en derivación con una resistencia adicional R en los

extremos de este circuito, entre los cuales hay una diferencia de potencial igual a u volts, está suspendido de un hilo de torsión en el interior del carrete $B\ B'$ (figura 166).

El hilo de torsión da lugar a un par que tiende a colocar los dos carretes en dos planos perpendiculares.

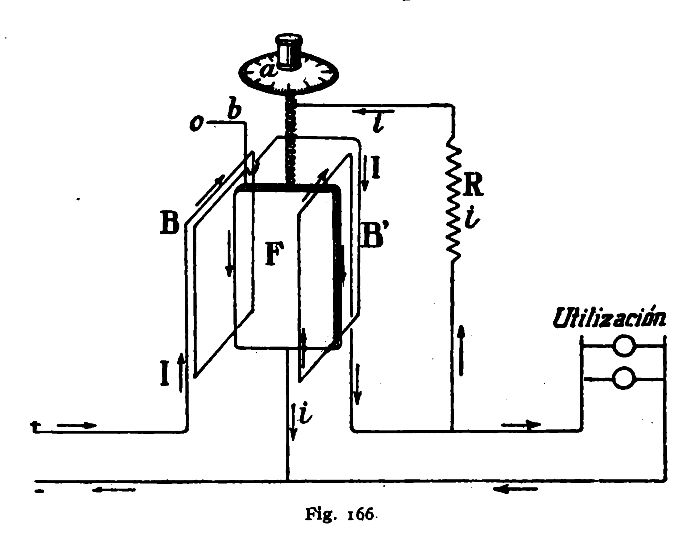


Fig. 166.

El carrete $B\ B'$ origina un campo $\mathcal{H}$ dirigido perpendicularmente a su plano; el carrete móvil, de resistencia r, recorrido por una corriente $i = \frac{u}{R + r}$ tiene un momento magnético $\mathcal{M} = s\ n\ i$, siendo s la superficie abrazada por una espira, y n el número de espiras. Ahora bien, por ser el plano de F paralelo a la dirección del campo $\mathcal{H}$, el carrete móvil estará sometido a un par cuyo valor será:

$$C_1 = \mathcal{H} \times sni.$$

Por efecto del par C_1, el cuadro móvil tiende a girar

alrededor del hilo de suspensión; se ejerce sobre este hilo una torsión de modo que el cuadro F quede en su posición inicial, es decir, de tal modo que el flujo a través de su plano y producido por los cuadros B y B' sea nulo. Si α es el ángulo de torsión necesario, que se mide por la desviación de una aguja a sobre un limbo graduado, el par de torsión será $C_2 = K\alpha$, y se tendrá:

(1) $$C_1 = C_2 \quad \text{o sea} \quad \mathcal{H} sni = K\alpha.$$

Se sabe que B B' y F son perpendiculares, cuando un índice b solidario de F está frente a una señal de referencia O.

Ahora bien, $\mathcal{H}$ es proporcional a la corriente I, por lo cual puede escribirse:

$$\mathcal{H} = K_1 I,$$

y la corriente i tiene por valor:

$$i = \frac{U}{R + r}.$$

Sustituyendo estos valores en la igualdad (1) resulta:

$$K_1 I sn \frac{U}{R + r} = K\alpha$$

de donde:

$$UI = \frac{K(R + r)}{K_1 sn} \alpha$$

y como K, R, r, K_1, s y n son cantidades constantes, se puede poner:

$$\frac{K(R + r)}{K_1 sn} = C$$

resultando finalmente:

$$UI = C\alpha,$$

La potencia medida es proporcional, como se ve, al ángulo de torsión. El aparato puede graduarse en watts determinando de una vez para siempre el valor de la constante *C*.

SENSIBILIDAD. — Se puede hacer variar la sensibilidad del aparato, es decir, modificar el valor de la constante *C*, actuando sobre *R*, o sea empleando varias

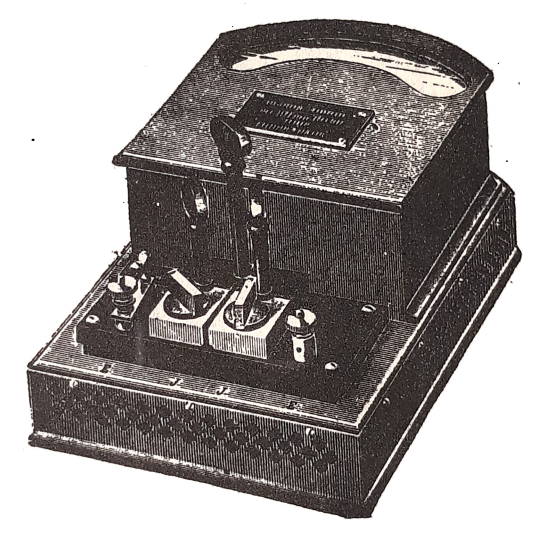


Fig. 167. — Wattímetro de lectura directa de Siemens.

resistencias adicionales, o actuando sobre φ, para lo cual se podrán agrupar en serie o en paralelo varios carretes de hilo grueso.

Los aparatos construídos de este modo son *wattímetros de torsión*, siendo su empleo incómodo, por lo cual no se han extendido mucho, usándose casi únicamente los wattímetros de lectura directa.

Wattímetros de lectura directa. — Este tipo de wattímetro está representado en perspectiva en las

figuras 167 y 168, y esquemáticamente en la 169; el carrete fijo está constituído por tiras de cobre aisla-

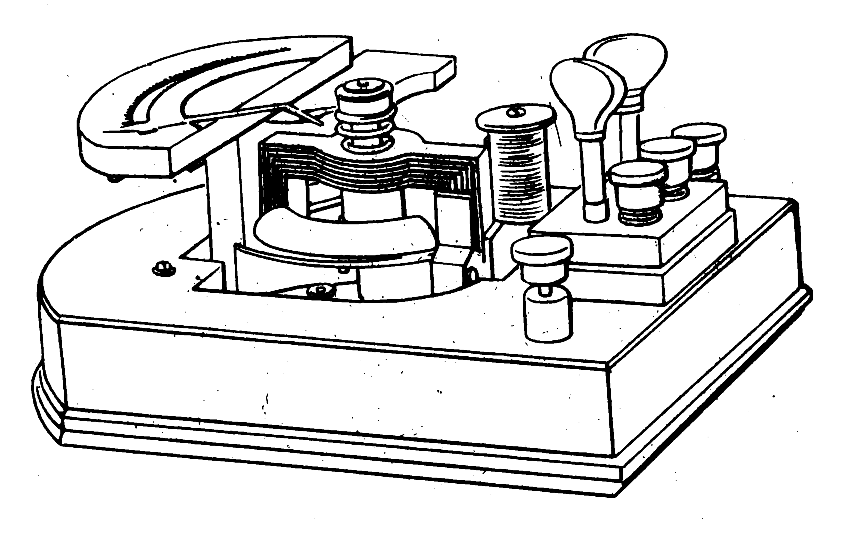


Fig 168. — Wattímetro Siemens.

das unas de otras y superpuestas; el carrete móvil, en cuyos extremos está aplicada la tensión U a través de una resistencia en serie, puede oscilar alrededor de un eje, como se ve en esta última figura.

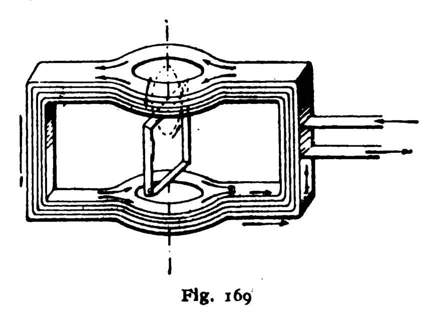


Fig. 169

El campo creado por el carrete fijo, recorrido por la corriente I, es normal al plano de sus espiras, de modo que cuando este campo forme un ángulo α con el plano de las espiras del carrete móvil, el flujo que

atraviese este último, recorrido por una corriente i, será:

$$\Phi = KI \text{ sen } \alpha,$$

y el par producido será:

$$C = KIi \cos \alpha \text{ (}^1\text{)}.$$

La construcción es tal que α varía de -45° a $+45^\circ$, es decir, 90°, y cos α variará por lo tanto de

$$1 : \sqrt{2} = 0{,}71 \text{ a } 1.$$

El par C es por lo tanto aproximadamente proporcional a Ii, o sea a UI.

La disposición de los carretes fijo y móvil permite tener divisiones casi equidistantes. Estos aparatos se construyen para muy diferentes límites de intensidad y tensión.

Para obtener varios límites de medida en intensidad se forma el carrete fijo con varios circuitos independientes; por ejemplo, para pequeñas intensidades, se utiliza un solo carrete, y para grandes intensidades se ponen dos carretes en paralelo por medio de un conmutador. Para las tensiones se consiguen varios límites de medida, poniendo en serie con el carrete móvil diferentes resistencias fijas, sin autoinducción.

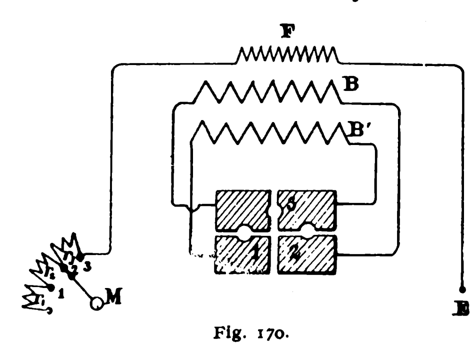


Fig. 170.

(1) Véase tomo I, GENERALIDADES, pág. 226.

Un wattímetro de esta clase puede representarse esquemáticamente como se ve en la figura 170; *B* y *B'* son dos carretes fijos independientes, cuyos extremos están unidos a los topes de cobre de un conmutador de clavija. Se ve que, cuando una clavija está en la posición 1 únicamente se utiliza el carrete *B*; en la posición 2, el carrete *B'* es el que queda introducido en circuito; si las dos clavijas están al mismo tiempo en 1 y 2, los carretes *B* y *B'* están en paralelo; por último, si una clavija está en la posición 3, los dos carretes están montados en serie. La tensión se aplica entre los bornes *E*, *M*, unidos al carrete móvil *F* a través del reostato r_1, r_2, r_3, poniendo la maneta sobre uno de los topes 1, 2 ó 3.

Una tabla que acompaña al aparato da para cada posición de las clavijas del conmutador y para cada posición de la maneta el número por el cual hay que multiplicar la indicación dada por la aguja para obtener el valor de la potencia medida.

Observación I. — Hay que hacer el montaje de tal modo que la diferencia de potencial entre el carrete móvil y los carretes fijos sea pequeña, porque de no ser así, por efecto de esta elevada tensión, el aislador que separa los carretes podría ser atravesado; se consigue este montaje haciendo que el extremo del carrete de hilo fino que no está unido a la resistencia adicional se una con el conductor en que está intercalado el carrete de hilo grueso (fig. 171).

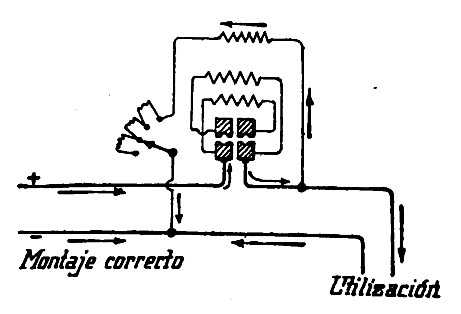


Fig. 171.

En la figura 172 se ve un montaje defectuoso para esta medición.

Cuando durante la medida hay que pasar del agrupamiento en paralelo al agrupamiento en serie de los carretes fijos, o al contrario, hay que tener cuidado de hacerlo cuando estos devanados estén respectivamente fuera de circuito o bien, en cortocircuito, porque la ruptura brusca de la corriente podría

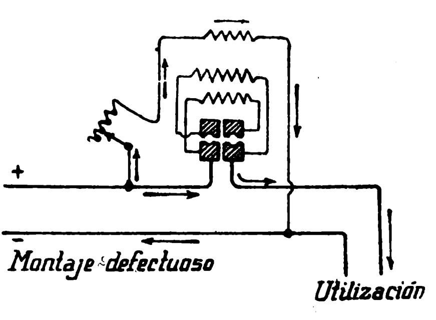


Fig. 172.

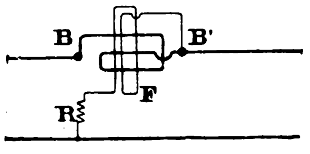


Fig. 173.

producir una tensión debida a la autoinducción capaz de romper el aislante que separa dos devanados fijos inmediatos.

La figura 173 representa esquemáticamente el montaje de un watímetro en un circuito.

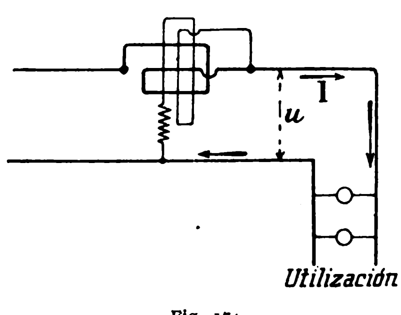


Fig. 174.

Observación II. —En estos esquemas se ve que el carrete de hilo grueso está montado como un amperímetro y que el carrete de hilo fino con su resistencia adicional está montado como un voltímetro. Lo dicho acerca del error cometido por la

potencia absorbida por el voltímetro o por el amperímetro (pág. 178) es aplicable del mismo modo a los circuitos del wattímetro. Por consiguiente, si la intensidad de la corriente es pequeña y la tensión elevada, se efectuará el montaje representado en la figura 174, porque el wattímetro indicará de más la potencia absorbida por el hilo grueso ρI^2, siendo ρ la resistencia del carrete fijo, y esta potencia es pequeña si la corriente lo es. Al contrario, si la corriente es alta y la tensión

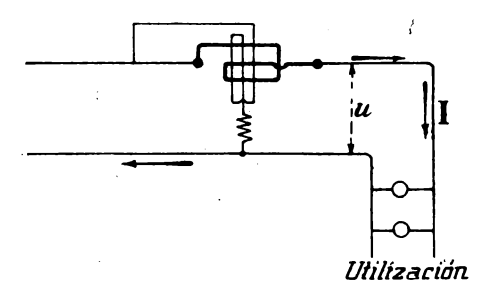


Fig. 175.

pequeña, se efectuará el montaje como indica la figura 175, pues el error es igual entonces a la potencia absorbida por el carrete de hilo fino $u\ i$, que es pequeña si u lo es también.

Wattímetros térmicos. — El wattímetro térmico construído por Chauvin-Arnoux consta, en esencia, de un hilo metálico arrollad sobre un cilindro C (fig. 176) y cuyos extremos A y B son fijos, formando así dos ramales AC y BC, los cuales están constantemente en tensión por medio del cilindro C sobre el cual actúa una lámina flexible solicitada por un muelle. El cilindro C lleva una palanca que transmite, amplificándolos, los movimientos de rotación del cilindro a una aguja.

Los extremos de un shunt S intercalado en uno de los conductores que llevan la corriente de utilización

están unidos a los extremos A y B. El punto medio C del hilo ACB está unido, a través de una resistencia elevada R, al otro conductor.

Sea I la corriente en el circuito, u la diferencia de potencial entre los extremos, s la resistencia del shunt,

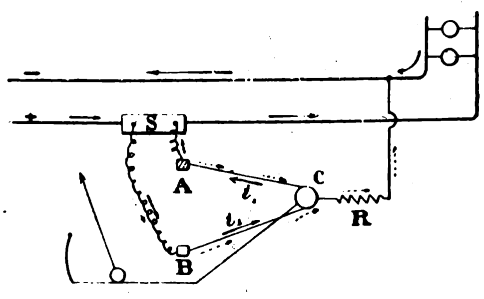


Fig. 176.

r la de cada uno de los ramales AC y BC. Bajo la influencia de la diferencia de potencial sI que hay entre los extremos del shunt, pasa por el hilo dilatable ACB una corriente de sentido indicado por la flecha, y de valor i_1:

$$i_1 = \frac{sI}{2r}.$$

Además, por efecto de la diferencia de potencial u, pasa una corriente por cada uno de los ramales AC y BC. La resistencia de este circuito tiene por valor $\frac{r}{2} + R$, y la corriente total es $\frac{u}{\frac{r}{2} + R}$, de modo que cada ramal es recorrido por la corriente:

$$i_2 = \frac{u}{2\left(\frac{r}{2} + R\right)} = \frac{u}{r + 2R}.$$

Se ve fácilmente que esta corriente es del mismo sentido que i_1 en el ramal BC y de sentido contrario en el AC; luego la corriente en BC será:

$$i_1 + i_2 = \frac{sI}{2r} + \frac{u}{r + 2R}$$

y en AC:

$$i_1 - i_2 = \frac{sI}{2r} - \frac{u}{r + 2R}.$$

La potencia absorbida en forma de calor en cada uno de estos ramales es, por consiguiente, para BC:

$$r\left(\frac{sI}{2r} + \frac{u}{r + 2R}\right)^2$$

y para AC:

$$r\left(\frac{sI}{2r} - \frac{u}{r + 2R}\right)^2.$$

Las dilataciones de estos ramales son proporcionales a esta potencia, y por lo tanto la desviación debida a la diferencia de dilataciones es proporcional a la diferencia entre estos dos valores, siendo por consiguiente de la forma:

$$d = Kr\left[\left(\frac{sI}{2r} + \frac{u}{r + 2R}\right)^2 - \left(\frac{sI}{2r} - \frac{u}{r + 2R}\right)^2\right]$$

o sea:

$$d = Kr \times \frac{4\,sIu}{2\,r(r + 2R)}$$

o también:

$$d = uI \times Ks\frac{2}{r + 2R}.$$

Es decir, que la potencia uI es proporcional a la desviación de la aguja.

El factor de proporcionalidad depende, por una parte, del aparato mismo, es decir, de la naturaleza, longitud del hilo dilatable, etc., y por otra parte del shunt y de la resistencia *R*. El constructor establece al mismo tiempo que el wattímetro, shunts y resistencias apropiadas a la intensidad de corriente y a la tensión utilizadas; la potencia medida se obtiene multiplicando la lectura hecha sobre la graduación del aparato por las constantes marcadas sobre el shunt y las resistencias.

II. Energía. — Contadores, en caso de corrientes continuas

Los contadores son aparatos que permiten registrar la energía gastada en un circuito durante un cierto tiempo.

Si i y u son respectivamente la corriente en el circuito durante un cierto tiempo t y la d. d. p. aplicada a los bornes, la potencia al cabo de dicho tiempo será ui. Si durante el tiempo θ no varían las cantidades u ni i, la energía gastada en este intervalo de tiempo es $ui\theta$. Para tener la energía gastada durante un tiempo T no hay más que hacer la suma de las cantidades como $ui\theta$ durante el tiempo T.

Si u e i permanecen invariables durante todo el tiempo que se esté gastando energía, bastará registrar esta duración, y el contador será un simple reloj que indicará el tiempo durante el cual se ha estado empleando la energía.

Si u es constante e i varía con las condiciones de funcionamiento de la corriente de utilización, bastará registrar la suma de las cantidades $i\theta$ y escribir frente al índice que indica esta suma su producto por el valor

fijo *u*; el contador es entonces un contador de cantidad, es decir, un amperhorímetro.

Por último, si *u* e *i* están sujetos a variaciones, el contador deberá registrar la suma de las cantidades $ui\theta$, y entonces se tiene un contador de energía.

Contador de cantidad. — *Contador O' K*. — Se compone este contador de un pequeño motor de imán permanente cuyo inducido resistente está en derivación en los extremos de una pequeña resistencia *R* recorrida por la corriente de utilización.

La armadura del inducido no tiene hierro; las espiras están devanadas

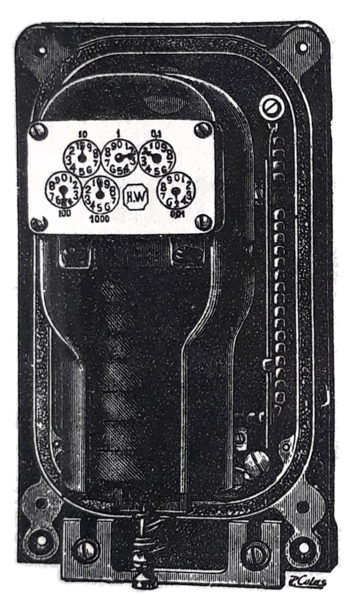


Fig. 177. — Contador de cantidad O'K.

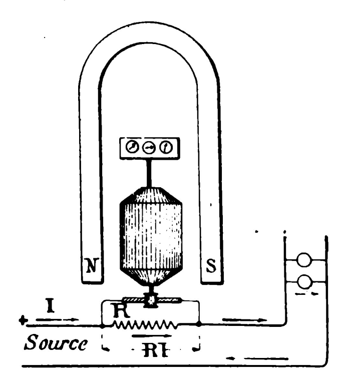


Fig. 178.

sobre cartón. Los frotamientos resultan despreciables, a causa de una construcción muy esmerada (figuras 177 y 178).

Siendo pequeña la resistencia *R*, y elevada la del inducido, la corriente tomada por el motor es pequeña, por ejemplo, igual a *i*; si *u* es la d. d. p. entre los extre-

mos de R, la potencia comunicada al motor es ui. Se sabe que si e' es la fuerza contraelectromotriz desarrollada por el motor, se tiene:

$$ui = e'i + \text{pérdidas de potencia.}$$

Estas pérdidas se componen de pérdidas por corrientes de Foucault, por efecto Joule, por histeresis y por rozamientos.

Ahora bien, por la construcción misma del contador, estas pérdidas son despreciables, teniéndose:

$$ui = e'i,$$

de donde:

$$u = e'.$$

Pero siendo I la corriente tomada por la utilización; se tiene:

$$u = RI$$

y por consiguiente:

(1) $$RI = e';$$

por otra parte, se tiene [1]:

$$e' = \frac{N n \Phi}{10^8} \text{ volts,}$$

siendo N el número de vueltas por segundo; n y Φ son constantes, por ser debido el flujo al imán permanente, luego poniendo $K = \frac{n\Phi}{10^8}$ se puede escribir:

$$e' = KN,$$

de donde, sustituyendo en (1):

$$RI = KN;$$

[1] Tomo I, GENERALIDADES, pág. 295.

multiplicando por θ los dos miembros de esta igualdad, resulta:

$$RI\theta = KN\theta,$$

de donde:

$$I\theta = \frac{K}{R} \times N\theta$$

o sea que la suma de los valores $I\theta$ durante el tiempo T es igual a la suma de los valores $N\theta$ multiplicada por $\frac{K}{R}$, lo cual puede escribirse del modo siguiente:

$$\Sigma I\theta = \frac{K}{R} \Sigma N\theta.$$

El primer miembro de esta igualdad representa la cantidad de electricidad utilizada durante el tiempo T; el segundo, el número de vueltas dadas durante el tiempo T por el motor, multiplicado por el factor constante $\frac{K}{R}$.

Por consiguiente, bastará por medio de una aguja registrar el número de vueltas e indicar frente a cada posición de las agujas el número de amperes-hora correspondiente o el número de watts-hora, si la tensión es constante.

Contador de energía. — I. *Contadores-motores.* — El tipo de contadores-motores es el *contador Thomson*, que es un motor shunt de inductor e inducido sin hierro. El inductor está formado por dos solenoides de hilo grueso S, S' en serie y atravesados por la corriente de utilización (figs. 179 y 180). El inducido A está devanado en tambor, y el hilo del devanado, de muy poca sección, está en derivación en los bornes del circuito de utilización a través de resistencias elevadas R en serie con

el mismo. Dicho inducido está constituído por ocho secciones arrolladas sobre corazas o armaduras de cartón; las ocho láminas del colector y las escobillas son de plata o de oro.

Sobre el eje del inducido está montado un disco de cobre *D* que puede girar entre los polos de un imán

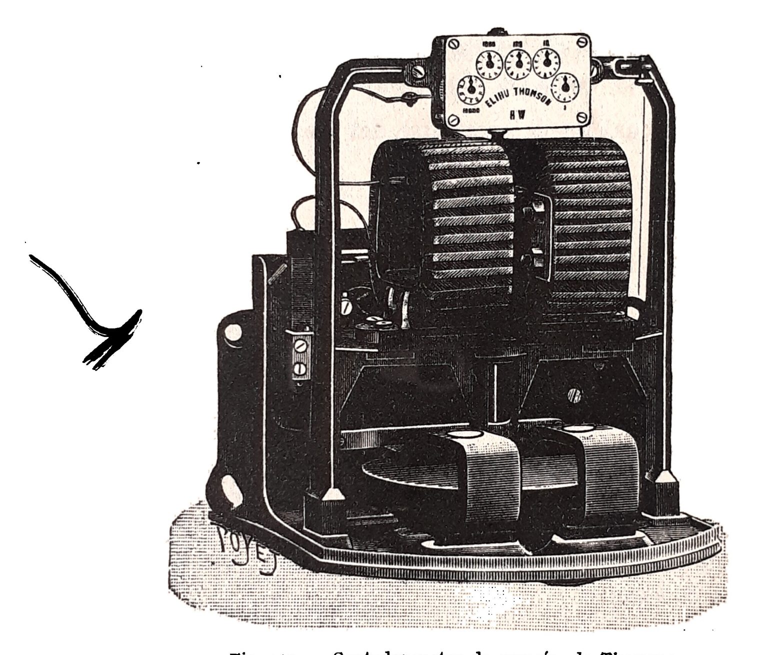


Fig. 179. — Contador-motor de energía, de Thomson.

permanente *P*. El motor está además compoundado por varias espiras *s* arrolladas en el interior de solenoides inductores y en serie con el inducido. Estas espiras tienen por objeto facilitar el arranque del motor con cargas pequeñas.

El par motor de este motor es proporcional al producto Φi del flujo a través de las espiras inducidas,

por la corriente en el inducido (tomo I, GENERALIDADES, pág. 298).

Ahora bien, el flujo Φ es proporcional a la corriente en los solenoides, es decir, a la corriente I en el cir-

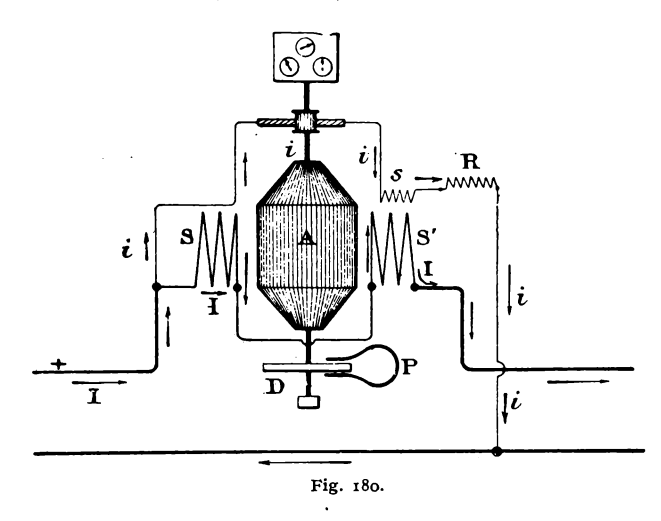


Fig. 180.

cuito de utilización, por no tener hierro el inductor; la corriente i en el inducido es proporcional a la d. d. p. u entre los bornes de la utilización. Luego dicho par es de la forma:

$$C_1 = K_1 u I.$$

Por efecto de este par, el inducido empieza a girar con una velocidad creciente (que sería uniformemente acelerada si no hubiera resistencia), pero el disco está sometido, por efecto de las corrientes de Foucault que se originan por su rotación entre los polos del imán, a un par resistente que aumenta con la velocidad. Por lo tanto, llegará un momento en que el par motor y el par resistente sean iguales y la velocidad será uniforme si uI es constante. Se demuestra que el par

resistente C_2 es proporcional a la velocidad N (siendo N el número de vueltas por segundo), es decir, que se tiene:

$$C_2 = K_2 N.$$

Cuando son iguales los pares C_1 y C_2, se tiene:

$$K_1 u I = K_2 N,$$

de donde:

$$N = \frac{K_1}{K_2} u I, \qquad \text{o sea} \qquad N = K u I.$$

Si la potencia $u\,I$ permanece constante durante un cierto tiempo θ, se podrá escribir:

$$N \times \theta = K u I \times \theta$$

y si se descompone el tiempo T durante el cual se quiere medir la energía absorbida en un cierto número de intervalos θ durante cada uno de los cuales la potencia permanece constante, se tendrá:

Suma de los valores $N\theta = K \times$ suma de los valores $uI\theta$, o sea:

$$\Sigma N \theta = K \Sigma u I \theta,$$

es decir, que el número de vueltas $\Sigma N\theta$ dadas por el contador durante el tiempo T es igual al factor constante K multiplicado por la energía $\Sigma uI\theta$ consumida durante este tiempo. Luego bastará tarar este aparato, o sea determinar el valor de K, y las agujas se moverán delante de escalas, que se podrán graduar en watts-hora, hectowatts-hora, etc.

Observación. — Es fácil comprender que el par debido a las corrientes de Foucault es proporcional a la velocidad. En efecto, si se supone uno de los filetes de

la corriente en el disco, el par que produce es proporcional al producto $I\Phi$, o sea a $\frac{e}{r}\Phi$, siendo r la resistencia constante de este filete, Φ el flujo constante del imán, y e la f. e. m. de inducción proporcional a la velocidad; luego el par es también proporcional a N.

Contador Vulcain. — Este contador sólo se diferencia del de Thomson en detalles de construcción; el disco de cobre está sustituído por un cilindro rodeado de una serie de pequeños imanes permanentes (fig. 181). Estos imanes están dispuestos según una corona y fijados sobre un eje que lleva un anillo agujereado, mediante el cual se pueden correr verticalmente y mantenerlos con un tornillo de presión que aprieta el anillo sobre el eje. Se regula el contador moviendo en un sentido conveniente el conjunto de imanes; si adelanta, habrá que elevar los imanes, y si retrasa, habrá que bajarlos.

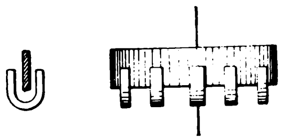


Fig. 181.

II. *Contador pendular. — Teoría.* — Se demuestra en Mecánica que la duración de la oscilación de un péndulo está dada por la relación:

$$t = 2\pi\sqrt{\frac{K}{Pl}},$$

siendo K el momento de inercia del péndulo, P su peso, y l la distancia del eje de oscilación a su centro de gravedad.

Si el mismo péndulo se somete a una fuerza F dirigida verticalmente, la duración de la oscilación se convierte en la siguiente:

$$t = 2\pi\sqrt{\frac{K}{(P+F)\,l}} \quad \text{o} \quad t = 2\pi\sqrt{\frac{K}{(P-F)\,l}}$$

según que F esté dirigida de arriba abajo, o al contrario.

El tipo de estos contadores es el contador Aron, que se compone en esencia de dos péndulos P, P' cuya masa está formada por dos carretes F, F' puestos en derivación, a través de resistencias elevadas R en serie con los mismos, entre los bornes del circuito de utili-

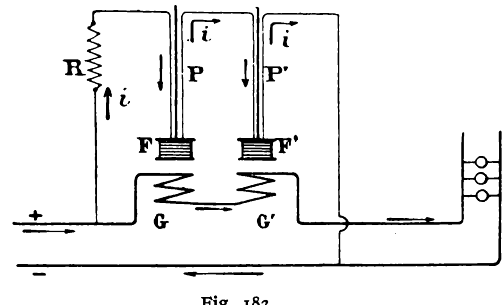


Fig. 182.

zación (fig. 182). Por debajo de cada péndulo hay dos carretes fijos de hilo grueso GG' recorridos por la corriente i proporcional a la d. d. p. u:

$$i = \frac{u}{R},$$

siendo R la resistencia total, compuesta de las resistencias adicionales y de la de los carretes móviles.

El sentido de los devanados es tal que para uno de los péndulos la acción del carrete fijo sobre el carrete móvil *se suma* al peso de este último, y *se resta* para el otro. Si F es esta acción, las duraciones de oscilación de los péndulos son:

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{K}{(P - F)\,l}} \quad \text{y} \quad t' = 2\pi \sqrt{\frac{K}{(P - F)\,l}}$$

y sus números de oscilaciones por segundo son respectivamente:

$$N = \frac{1}{t} \quad \text{y} \quad N' = \frac{1}{t'},$$

o sea:

$$(1) \qquad N = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{(P+F)\,l}{K}} \qquad N' = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{(P-F)\,l}{K}}.$$

Cuando no hay corriente, el número de oscilaciones por segundo para cada péndulo es:

$$n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{Pl}{K}}$$

valor que resulta de hacer $F = 0$ en las igualdades anteriores, de donde:

$$K = \frac{Pl}{4\pi^2 n^2}.$$

Llevando este valor de K a las igualdades (1) se tiene:

$$N = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{(P+F)\,l \times 4\pi^2 n^2}{Pl}}$$

y

$$N' = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{(P-F)\,l \times 4\pi^2 n^2}{Pl}}$$

y simplificando estas expresiones:

$$N = n\sqrt{1 + \frac{F}{P}} \qquad N' = n\sqrt{1 - \frac{F}{P}}$$

y restando ordenadamente la segunda de la primera:

$$N - N' = n\left(\sqrt{1 + \frac{F}{P}} - \sqrt{1 - \frac{F}{P}}\right).$$

Ahora bien, F es muy pequeña comparada con P, de modo que $\frac{F}{P}$ es un número bastante menor que la unidad; las potencias de este número son muy pequeñas y pueden despreciarse, resultando que $\frac{F^2}{4P^2}$ es un número extremadamente pequeño, y no se alterará de un modo apreciable el valor de $N - N'$ sumando $\frac{F^2}{4P^2}$ a las dos expresiones $1 + \frac{F}{P}$ y $1 - \frac{F}{P}$ por lo cual se podrá escribir:

$$N - N' = n\left(\sqrt{1 + \frac{F}{P} + \frac{F^2}{4P^2}} - \sqrt{1 - \frac{F}{P} + \frac{F^2}{4P^2}}\right),$$

o sea:

$$N - N' = n\left[1 + \frac{F}{2P} - \left(1 - \frac{F}{2P}\right)\right] = n\frac{F}{P}.$$

Se puede demostrar con toda exactitud que el error que se comete de este modo es menor que $\frac{1}{3} \times \frac{F^3}{P^3}$, que es un número despreciable.

Por consiguiente, se puede admitir como exacta la igualdad:

$$N - N' = n\frac{F}{P}.$$

Pero la fuerza F es proporcional a la potencia utilizada; en efecto, la acción del carrete fijo, recorrido por la corriente I, sobre el carrete móvil recorrido por i es proporcional a Ii (1), y como por otra parte i es proporcional a u, resulta:

$$F = K_1 u I,$$

(1) Si a es el número de espiras de cada uno de los carretes fijos recorridos por la corriente I, se sabe que estos carretes obran

y sustituyendo este valor de F en la expresión de $N - N'$, se tiene:

$$N - N' = \frac{n K_1 u I}{P}$$

y multiplicando los dos miembros por el tiempo θ:

$$(N - N')\,\theta = \frac{n K_1}{P}\,u I \theta$$

y poniendo $\frac{nK_1}{P} = K$, se tiene finalmente:

$$(N - N')\,\theta = K u I \theta, \quad \text{o sea:} \quad \Sigma\,(N - N')\,\theta = K\,\Sigma\,u I \theta,$$

es decir, que la suma de valores $(N - N')\ \theta$ durante un tiempo T es igual a K multiplicada por la suma de valores $uI\theta$ durante este mismo tiempo.

Por consiguiente, la energía consumida durante un cierto tiempo es proporcional a la diferencia entre los números de oscilaciones efectuadas por los dos péndulos en este tiempo.

como imanes cuyo momento magnético fuera igual a saI, siendo s la superficie de cada espira. Si λ es la longitud de cada carrete, el imán a que da lugar tiene una masa magnética en cada polo igual a m, y por lo tanto, un momento magnético igual a λm; luego se tiene:

$$saI = \lambda m, \quad \text{de donde} \quad m = \frac{sa}{\lambda} I = kI.$$

Del mismo modo, cada carrete de hilo fino recorrido por una corriente i obra como un imán que tuviera en cada polo una masa magnética m' tal que $m' = s'a'i' : \lambda'$, o sea, $m' = k'i$, siendo respectivamente a', s', λ' el número de sus espiras, la superficie de cada espira y la longitud del carrete de hilo fino.

Si los sentidos de los devanados son tales, que dos polos de nombres contrarios estén enfrente, el carrete móvil está sometido a una atracción proporcional a las masas magnéticas, es decir, de la forma KIi. Los polos de los otros dos carretes que están de frente son del mismo signo, dando lugar a una repulsión sobre el carrete móvil (de abajo hacia arriba), también de la forma KIi.

Un tren diferencial hace avanzar las agujas, registrando de este modo la diferencia entre los números de oscilaciones de los dos péndulos, y las escalas podrán estar graduadas en watts, hectowatts, kilowatts-hora.

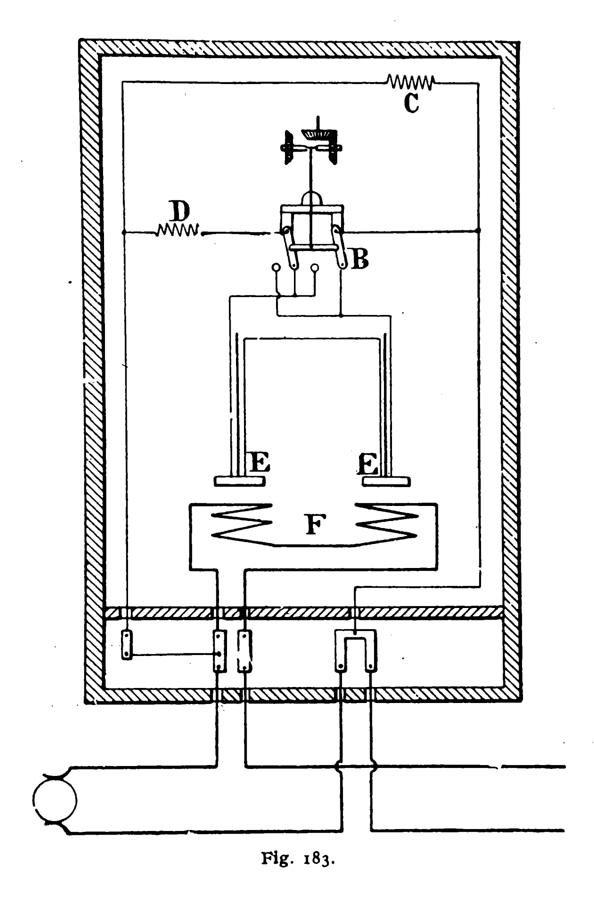


Fig. 183.

La teoría expuesta supone que el número de oscilaciones en el mismo tiempo es igual para los dos péndulos cuando no hay carga ninguna. Esta condición es imposible de realizar de un modo riguroso, lo cual

puede salvarse del modo siguiente: supongamos que todo esté dispuesto de modo que, en carga, el péndulo de la derecha avance sobre el de la izquierda, dando las agujas el exceso del número de oscilaciones del primero sobre el segundo. Ahora bien, si por efecto de la construcción del contador, se verifica que sin carga, el péndulo de la derecha avanza sobre el de la izquierda, el contador indicará una energía mayor de la realmente gastada; lo contrario sucedería si el péndulo retrasara respecto al de la izquierda. Para anular estos errores, se invierte a cada diez minutos la acción de los péndulos; de este modo, invirtiéndose a cada diez minutos el sentido de la corriente en los carretes de hilo fino, las agujas registran durante diez minutos el exceso del número de oscilaciones del péndulo de la derecha sobre el de la izquierda, y durante los diez minutos siguientes, el exceso de las oscilaciones del péndulo

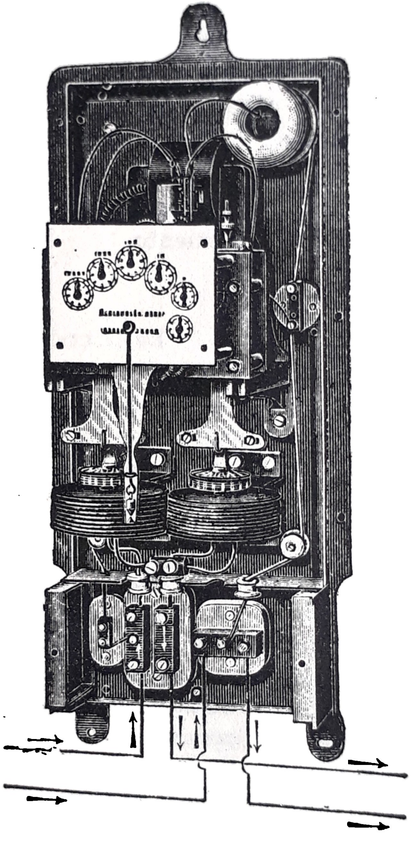


Fig. 184. — Contador eléctrico montado en casa del abonado.

de la izquierda sobre las del péndulo de la derecha. Para conseguir esto, el mismo mecanismo que invierte el sentido de la corriente en los carretes invierte el efecto de los péndulos en las agujas, de modo que éstas avanzan siempre en el mismo sentido (figs. 183 y 184).

Un mecanismo de relojería pone en movimiento los péndulos y a cada veinte segundos se da cuerda automáticamente, mediante un electroimán por el cual pasa una pequeña corriente durante un tiempo muy corto; la armadura es atraída y pone en tensión un muelle que mantiene el movimiento.

EJERCICIOS

I. *a*) Medir las resistencias de los carretes fijos de un wattímetro, comparándolas con las resistencias de un shunt de amperímetro por el método indicado en la página 100.

Deducir de estas medidas la manera de acoplar los circuitos para las distintas posiciones de las clavijas.

b) Medir, con el puente, los valores de la resistencia del carrete móvil con las diferentes resistencias introducidas en serie con ella por la maneta del aparato. Completar la tabla que acompaña al aparato y que da el valor en watts por división de la escala, para diferentes posiciones de las clavijas y de la maneta, sumando los valores correspondientes de la resistencia del circuito de hilo grueso y la del circuito de hilo fino.

II. — **Potencia absorbida por una lámpara**

Hacer el montaje indicado en la figura 185: en esta figura *P* y *R* son inversores de cápsulas de mercurio; *i* el interruptor del voltímetro; *L* la lámpara; *W* el wattímetro; *A* y *S* el amperímetro y su shunt, y *V* el voltímetro.

a) Colocar la horquilla del inversor *G* en la posición *ab* y representar esquemáticamente el montaje del wattímetro.

b) Colocar las horquillas del inversor *R* en las posiciones 1-3 y 1-4, leer la indicación *I* del amperímetro y cerrar el interruptor *i*, leyendo la indicación *u* del voltímetro. Supondremos que el voltímetro y el amperímetro son rigurosamente exactos, lo cual se podrá comprobar por el

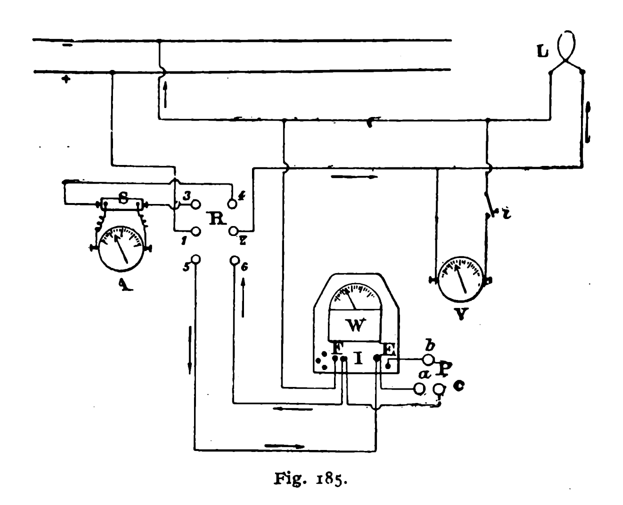


Fig. 185.

método expuesto en la página 151, o se corregirán las lecturas, en caso necesario. La potencia absorbida por la lámpara es, en estas condiciones, *uI* watts.

c) Estando levantado el interruptor *i*, se colocan las horquillas de *R* en las posiciones 1-5, 2-6, después de haber elegido convenientemente las posiciones que hay que dar a las clavijas y a la maneta del wattímetro; se lee el número indicado por la aguja sobre la escala y se multiplica este número por el coeficiente que corresponde a los límites de medida tomados por la corriente y para la tensión. De este modo se obtiene la potencia *W* indicada por el aparato.

d) Repetir las mismas medidas colocando la horquilla del inversor *P* en la posición *bc*; representar esquemáticamente este nuevo montaje; comprobar que la nueva potencia indicada por el aparato supera en *uI* a la potencia absorbida por el circuito de hilo fino, cuya resistencia ρ ha

sido medida. Esta potencia es ui (siendo i la corriente en el carrete móvil), y como $i = \frac{u}{\rho}$ se tiene $ui = \frac{u^2}{\rho}$.

e) Probar que el primer montaje es preferible al segundo.

III. — Potencia absorbida en un circuito de pequeña resistencia

Se toma un reostato metálico cuyo hilo sea de gran sección y capaz de soportar una corriente de 15 amperes aproximadamente. Se repiten los mismos montajes y las mismas medidas que anteriormente; se comparan los resultados obtenidos con los dos montajes, y se calcula para cada uno de estos montajes el valor del error cometido, deduciendo para este caso el mejor modo de hacer el montaje.

IV. — Comprobación de un wattímetro

Se efectúa el montaje indicado en la figura 186, donde *B*

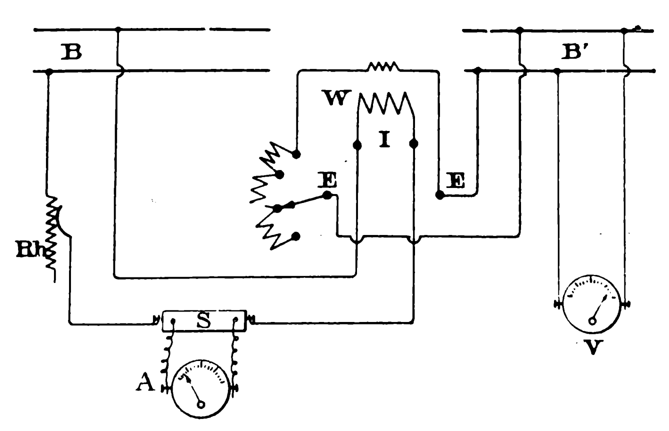


Fig. 186.

es una batería de acumuladores de un pequeño número de elementos, que da en el carrete fijo una corriente, que se

puede hacer variar por medio del reostato *Rh*, bajo una pequeña tensión; *B'* es una batería que da una tensión elevada y una corriente pequeña en el carrete móvil; *A* es el amperímetro y *V* el voltímetro.

La comprobación consiste en buscar la constante por la cual hay que multiplicar la lectura para obtener la potencia correspondiente. Para unos límites de medida fijados para la intensidad y la tensión, se hacen varias lecturas' haciendo variar entre sus límites el valor de la corriente. Se anota para una de estas lecturas la corriente *I* dada por el amperímetro, la tensión *u* dada por el voltímetro y la lectura *n* hecha sobre la escala del wattímetro. Los resultados que se obtengan se resumen en una tabla como la siguiente:

Nos	AMPERÍMETRO			VOLTÍMETRO			LECTURAS sobre la escala del wattímetro	CONSTANTE
	Lecturas	Shunts	Amperes I	Lecturas	Sensibilidad	Volts u	n	$\frac{uI}{n}$

Se compara la constante así obtenida con la indicada por el constructor, y si es preciso se construye la curva que dé los valores de las constantes para las indicaciones de la escala del wattímetro.

V. — Estudio de un contador

a) Representar esquemáticamente las diferentes partes del contador y las conexiones interiores.

b) Instalar el contador de modo que registre la energía consumida por un cierto número de lámparas.

c) Comprobación.

Supongamos que se trata de un contador Vulcain, y que el contador esté colocado en casa de un abonado. El conductor que une uno de los bornes *A* (abonado) del contador con el circuito alimentado se desprende de este borne *A* y se pone en éste el amperímetro o su shunt; un voltímetro se pone en derivación entre los bornes *A* como se ve en el esquema de montaje de la figura 187. Se alimentan las lámparas *L* con una batería de acumuladores *Ac*.

Un operador cuenta el número de vueltas que da el contador, para lo cual se marca un trazo en el disco de

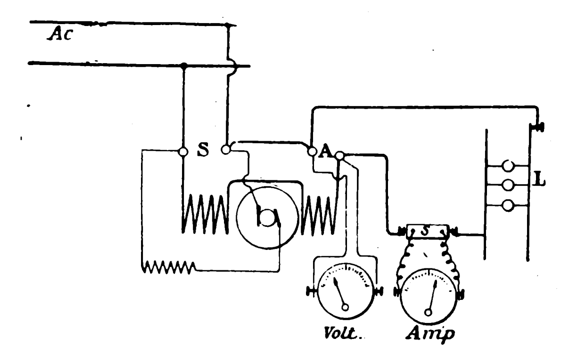


Fig. 187.

cobre que se mueve; este operador tiene un cronómetro cuya aguja se mantiene en el cero hasta el momento en que la señal pasa por delante del mismo, en cuyo instante aprieta el botón de escape, contando *cero*, y cuando la señal vuelve a aparecer por primera vez cuenta 1, y después 2, 3... Al mismo tiempo dos observadores leen y anotan las indicaciones del voltímetro y del amperímetro. Si el circuito de utilización está alimentado, como hemos supuesto por un instante, por una batería de acumuladores, y únicamente contiene lámparas de incandescencia, estas indicaciones permanecerán invariables durante la comprobación. Pero se pueden agregar motores para obtener una carga suficiente, que será el caso que con más frecuencia se presente en las casas de los abona-

dos, variando entonces las indicaciones del voltímetro y del amperímetro; en este caso, a partir de una señal dada por uno de los observadores que leen el amperímetro y el voltímetro, se leen a cada diez segundos sus indicaciones, y al terminar la prueba se toma la medida de los números obtenidos.

El primer operador cuenta un número de vueltas tal que la duración de la observación sea de un minuto aproximadamente, y anota el número de vueltas contadas, así como la duración exacta de este número de vueltas.

Sean N el número de vueltas y T segundos su duración; u e I la tensión y la intensidad dadas por el voltímetro y el amperímetro, o las medias de estas indicaciones durante los T segundos.

La potencia tomada por la utilización durante la observación es uI watts y la energía consumida será:

$$W = u \times I \times T \text{ watts-segundo, o sea: } \frac{u \times I \times T}{3600} \text{ watts-hora.}$$

La energía registrada por el contador es:

$$W' = K \times N \text{ watts-hora,}$$

siendo K la constante del contador, es decir, el número de watts-hora registrado por las agujas para una vuelta del disco, número que está marcado sobre el contador. Sólo hay que comparar entonces el valor primero $\frac{u \times I \times T}{3600}$ con el segundo KN.

Se repiten estas operaciones para distintas cargas obtenidas haciendo variar el número de lámparas L; por ejemplo, se podrá hacer una comprobación para $^1/_4$, $^1/_3$, $^1/_2$, $^2/_3$, $^3/_4$ de carga, y a plena carga del contador.

Para cada una de estas cargas se calcula el error absoluto $W - W'$, y el error relativo en tanto por 100,

$$\frac{(W = W')\ 100}{W}.$$

Los resultados se resumen en una tabla como la siguiente:

Constante del contador: $K =$

Fracciones de la carga total	Número de vueltas contadas N	Energía registrada por el contador KN	Amperímetro				Voltímetro				Duración de las N vueltas T segundos	Energía consumida $\frac{uIT}{3600}$	Errores absolutos		Errores relativos en %	
			Shunts	Lecturas	Amperes	Medias I	Sensibilidad	Lecturas	Volts	Medias u			por exceso	por defecto	por exceso	por defecto
1/1 . . .																
1/3 . . .																

Construir una curva que represente los errores relativos en función de la carga. Esta curva tendrá por abscisas los valores KN indicados, y por ordenadas los errores relativos correspondientes.

d) *Regulación.* — Si el error relativo es mayor del 3 %, hay que regular el contador, para lo cual el procedimiento más sencillo consiste en actuar sobre los imanes que rodean al disco o al cilindro de cobre. Esta operación se hace generalmente en un laboratorio, donde se hace el montaje indicado por la figura 188.

El circuito de hilo grueso (inductor) es alimentado por una batería de pequeña tensión B' (dos o tres elementos de corriente elevada), a través de un reostato *Rh*. El circuito de hilo fino (inducido) está alimentado por una batería B cuyo número de elementos es suficiente para dar la tensión normal u bajo la cual debe funcionar el contador. Esta batería da siempre una corriente muy pequeña. Con esta disposición se puede comprobar el contador para grandes potencias, no empleando más que una potencia pequeña (en el hilo grueso, pequeña tensión y gran intensidad; en el hilo fino, tensión elevada y pequeña intensidad). Se varía

el reostato *Rh* de modo que se obtenga una corriente *I* tal que el producto *uI* sea igual a la potencia para la cual se quiere regular el contador, y se procede como antes. Supon-

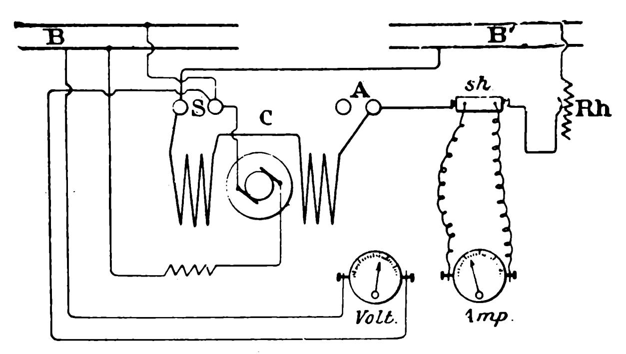


Fig. 188.

gamos, por ejemplo, que se encuentre que el contador *adelanta*, en este caso se corre la corona de imanes (contador Vulcain) de modo que abracen una superficie mayor del cilindro (fig. 189). Después de hacer esta regulación, se comprueba que el error de la plena carga para una carga muy pequeña no es superior aproximadamente al 3 %.

e) Estudiar la influencia del compoundado, acercando o alejando del inducido los carretes de hilo fino, que son

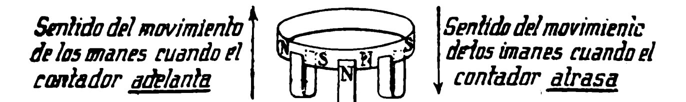


Fig. 189.

generalmente móviles y regulables, haciendo el *tarado* para dos o tres posiciones de estos carretes.

f) Medir la resistencia del hilo en frío y en caliente, es decir, antes de utilizar el contador y después de haber estado éste funcionando durante una media hora aproximadamente; dicha resistencia no debe variar de valor.

g) *Gasto del contador.* — 1.º *En vacío o sin carga.* — Este gasto se debe al paso de la corriente por el hilo fino. Se mide la resistencia r de este hilo fino (inducido y resistencia en serie) bajo la influencia de la tensión u; la corriente en este hilo es $i = \frac{u}{r}$, y la potencia consumida será:

$$\frac{u}{r} \times u = \frac{u^2}{r}.$$

2.º *Gasto en carga.* — Se mide la resistencia R de los carretes inductores; para una corriente I, correspondiente a la carga uI, la potencia absorbida por estos carretes es RI^2; y la potencia total será:

$$\frac{u^2}{r} + RI^2.$$

Calcular para diferentes cargas el consumo o gasto del contador, en tanto por 100.

VI. *a*) Hacer el mismo estudio con un contador $O'K$. Los bornes A y B están unidos por un hilo ACB, y el inducido del contador está derivado entre dos puntos A y C de este hilo (figura 190); la regulación se hace corriendo en un sentido conveniente el cursor C.

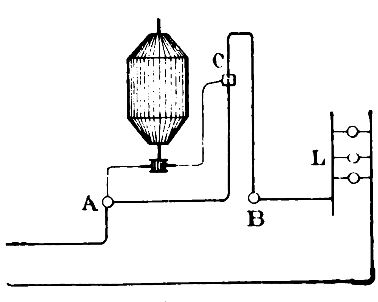


Fig. 190.

b) Empleo de un contador $O'K$ para la medida del rendimiento en cantidad de una batería de acumuladores.

Se coloca en serie en el circuito de carga el contador, cuyo número indicado por las agujas se ha leído de antemano y anotado.

Una vez terminada la carga, se lee el nuevo número indicado por el contador; la diferencia entre los dos números mide la cantidad de electricidad empleada en la carga.

Si las esferas del contador están graduadas en watts-hora, dividir el número obtenido por la tensión en volts, inscrita en el aparato, para obtener el número de amperes-hora tomados en la carga. Se instala a continuación, durante la descarga, el contador en el circuito, y se mide la cantidad devuelta en la descarga. De estas medidas se deduce fácilmente el rendimiento en cantidad de la batería en cuestión.

CAPÍTULO X

Medida de las cantidades magnéticas

1. Prueba de un hierro. Ciclo de histeresis. — Con el hierro de que se trata se forma un toro sobre el cual se arrollan: un devanado de hilo grueso que pueda soportar una corriente de 15 a 20 amperes, y un devanado de hilo fino cuyos extremos estén unidos a los bornes de un galvanometro balístico B, a través de una resistencia r de 1 000 ohms aproximadamente (fig. 191).

El devanado de hilo grueso puede ser atravesado por una corriente producida por acumuladores; se puede hacer variar la intensidad de esta corriente por medio del reostato R cuyas resistencias están en paralelo, y su sentido se puede cambiar por medio de un inversor K. Se empieza por desimanar el hierro, que es posible tuviera algún magnetismo remanente; para ello se hace que recorra el carrete una corriente cada vez más pequeña hasta llegar a cero, invirtiendo para cada uno de sus valores el sentido de la misma mediante el inversor K. Durante estas operaciones, se pone el galvanómetro en cortocircuito o fuera del circuito.

Terminada esta desimanación y vuelto a poner el galvanómetro en el circuito del devanado de hilo fino, se opera del modo siguiente: se hace aumentar poco a

poco la corriente en el devanado de hilo grueso, estando el inversor en la posición 1-3, 2-4, por ejemplo; cada vez que se introduce una resistencia en el reostato *Rh* se anota la elongación correspondiente pro-

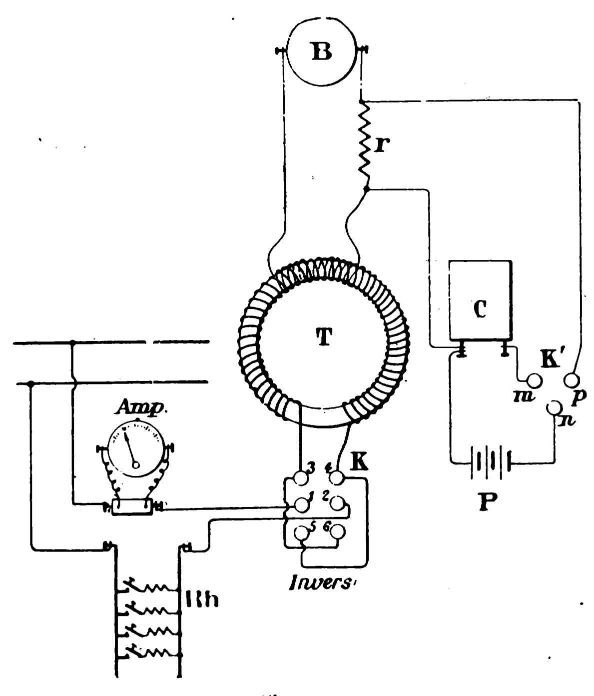


Fig. 191.

ducida, y la intensidad de la corriente. Cuando se alcanza el valor máximo de la corriente, se hace que disminuya más cada vez, anotando siempre la elongación correspondiente a cada disminución.

Cuando la corriente ha llegado a cero, se le invierte en el carrete colocando en la posición 1-5, 2-6 el inversor; después, en este nuevo sentido, se hace crecer la corriente hasta llegar al mismo valor máximo de antes, y a conti-

nuación se la hace disminuir hasta cero. Se vuelve a invertir su sentido y se le lleva progresivamente hasta su valor máximo primero.

Sea I el primer valor de la corriente enviada al devanado de hilo grueso, y $\mathcal{B}$ la inducción correspondiente en el hierro. Cuando la corriente pasa de 0 a I, la inducción aumenta de 0 a $\mathcal{B}$ y el flujo a través del devanado de hilo fino crece de 0 a $\mathcal{B}\, s\, n$, siendo s la superficie de las espiras del devanado de hilo fino, y n el número de estas espiras. Por consiguiente, en este devanado, durante este aumento de la corriente, se produce una cantidad de electricidad igual a $\frac{\mathcal{B}\, s n}{10^8\, R}$ coulombs (¹), que atraviesa el galvanómetro balístico y produce una elongación θ. La resistencia R es igual a $\rho + r + g$, siendo ρ la resistencia del devanado de hilo fino, y g la del galvanómetro; es evidente que se verifica la siguiente igualdad:

$$\frac{\mathcal{B}\, s\, n}{10^8\, R} = K\, \theta,$$

donde K es la constante del galvanómetro. De esta igualdad se deduce:

$$\mathcal{B} = \frac{K\, R}{s\, n} \times \theta \times 10^8.$$

Ahora bien, K, R, s y n conservan los mismos valores para todos los de la corriente I, y por consiguiente la expresión $\frac{K\, R}{s\, n} \times 10^8$ puede determinarse de una vez para siempre; sea $\mathcal{A}$ el valor de esta expresión. Se tiene, sustituyendo:

$$\mathcal{B} = \mathcal{A}\, \theta.$$

(¹) Tomo I, GENERALIDADES, pág. 170.

Cuando la corriente pasa de I al valor siguiente I', la inducción en el hierro pasa de $\mathcal{B}$ a $\mathcal{B}'$, lo cual produce una elongación θ', y se tiene:

$$\mathcal{B}' - \mathcal{B} = \mathcal{A}\,\theta', \qquad \mathcal{B}' = \mathcal{B} + \mathcal{A}\,\theta' = \mathcal{A}\,(\theta + \theta')$$

y así sucesivamente.

Si la corriente toma los valores sucesivos

$$o,\ I_1,\ I_2,\ i_3,\ \ldots,\qquad I_{n-1},\ I_n,$$

y si, cuando se pasa de uno a otro de estos valores, las elongaciones observadas son θ_1, $\theta_2, \ldots\ \theta_{n-1}$, θ_n, las inducciones en el hierro tendrán los valores:

$$o,\ \mathcal{B}_1,\ \mathcal{B}_2,\ \mathcal{B}_3,\ \ldots,\qquad \mathcal{B}_{n-1},\ \mathcal{B}_n,$$

tales que cumplirán con las siguientes condiciones:

$$\left.\begin{array}{r} \mathcal{B}_1 = \mathcal{A}\,\theta_1 \\ \mathcal{B}_2 - \mathcal{B}_1 = \mathcal{A}\,\theta_2 \\ \mathcal{B}_3 - \mathcal{B}_2 = \mathcal{A}\,\theta_3 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \mathcal{B}_n - \mathcal{B}_{n-1} = \mathcal{A}\theta_n \end{array}\right\} \text{ de donde } \left\{\begin{array}{l} \mathcal{B}_1 = \mathcal{A}\theta_1 \\ \mathcal{B}_2 = \mathcal{A}\,(\theta_1 + \theta_2) \\ \mathcal{B}_3 = \mathcal{A}\,(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \mathcal{B}_n = \mathcal{A}\,(\theta_1 + \theta_2 + \ldots + \theta_n) \end{array}\right.$$

Los resultados de estas operaciones se reúnen en un cuadro como el que sigue:

$K =\quad ,n =\quad ,s =\quad ,R =\quad ,\mathcal{A} =\quad ; \dfrac{KR}{s\,n} \times 10^8 =\quad ,d =$

Nos	INTENSIDAD DE LA CORRIENTE			Elongación θ	SUMA de las elongaciones sucesivas $\Sigma\,\theta$	INDUCCIÓN $\mathcal{B} = \mathcal{A}\Sigma\theta$	CAMPO $\mathcal{H} = \frac{2NI}{5d}$	COEFICIENTES de permeabilidad $\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$
	Lecturas	Shunts	Amperes I					

La sección s, el número n y la resistencia R se pueden medir con toda facilidad. Es necesario determinar la constante K del galvanómetro, es decir, la cantidad de electricidad expresada en coulombs que produce al atravesar el galvanómetro, una elongación igual a la unidad. Para ello se coloca una horquilla en las cápsulas de mercurio mn del inversor K', se carga un condensador de capacidad conocida igual a C microfarads, bajo una d. d. p. E, fuerza electromotriz de una pila de varios elementos P. Este condensador toma una carga igual a CE microcoulombs o sea, $\frac{C \times E}{10^6}$ coulombs.

El condensador está derivado como indica la figura 191 entre los extremos de la resistencia r cuando se unen las dos capsulitas m y p. Entonces se descarga sobre las resistencias en paralelo r y $g + \rho$, y por lo tanto pasa por el galvanómetro una cantidad de electricidad igual a:

$$\frac{CE}{10^6} \times \frac{r}{r + \rho + g}, \quad \text{o sea:} \quad \frac{CE}{10^6} \times \frac{r}{R} \text{ coulombs.}$$

El galvanómetro acusa una desviación de la aguja tal como α, teniéndose:

$$\frac{CE}{10^6} \times \frac{r}{R} = K\alpha,$$

de donde:

$$K = \frac{C \times E \times r}{R\alpha \times 16^6}.$$

Por último, para cada valor de la inducción $\mathcal{B}$ se podrá calcular el valor del coeficiente de permeabilidad correspondiente. En efecto, para una corriente I, el campo creado por el devanado de hilo grueso es:

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi \times NI}{\pi d \times 10} = \frac{2\,NI}{5d},$$

siendo d centímetros el diámetro medio del toro (figura 192), y por consiguiente se puede calcular μ, ya que:

$$\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}.$$

Para construir el ciclo de histeresis bastará tomar por abscisas los valores del campo $\mathcal{H}$ y por ordenadas los valores correspondientes de la inducción $\mathcal{B}$.

Por ejemplo, se toma la escala siguiente: 1 centímetro para cada 10 unidades para el campo, y 1 centímetro para 1 000 unidades para la inducción.

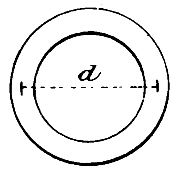


Fig. 192.

Del ciclo de histeresis se puede deducir la pérdida por histeresis en el toro. Si el volumen del toro es V centímetros cúbicos, y la superficie del ciclo es S centímetros cuadrados, la energía gastada por histeresis por el ciclo es:

$$W = \frac{V \times S}{2\pi \times 10^7} \text{joules}.$$

Como, por otra parte, se conoce la inducción máxima a que el hierro ha llegado, se podrá calcular su coeficiente de Steinmetz η.

Se sabe, en efecto, que:

$$W = \eta V \times \mathcal{B}^{1,6} \text{ joules};$$

por lo tanto:

$$\frac{V \times S}{2\pi \times 10^7} = \eta V \times \mathcal{B}^{1,6},$$

de donde:

(1) $$\eta = \frac{S}{2\pi \times \mathcal{B}^{1,6} \times 10^7}.$$

Observación. — Hay que tener en cuenta en el cálculo de la superficie del ciclo, que se han tomado

dos escalas diferentes para las abscisas y las ordenadas.

II. Medida del valor del campo magnético en un entrehierro. — Se introduce en el entrehierro un carrete plano cuyo número n de espiras se conozca perfectamente, y la superficie s de cada una de ellas. Sus extremos se unen a un galvanómetro balístico a través de una resistencia r (fig. 193). Se hace pasar por el carrete que rodea los núcleos y crea el campo, una corriente I; se corta bruscamente esta corriente y se lee la elongación producida 0; sea $\mathcal{H}$ el valor desconocido del campo; el flujo a través del carrete pequeño es:

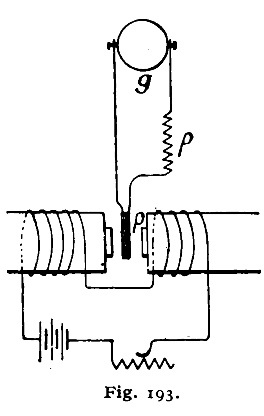


Fig. 193.

$$\Phi = \mathcal{H} \times s \times n;$$

cuando la corriente se corta, este flujo se anula, resultando una variación igual a $\mathcal{H} \times sn$, y por consiguiente el galvanómetro ha sido atravesado por una cantidad de electricidad:

$$q = \frac{\mathcal{H} \times s \times n}{(r + g + \rho)\, 10^8} \text{ coulombs;}$$

donde ρ es la resistencia del carrete y g la resistencia del galvanómetro. Se tiene, según esto:

$$(1) \qquad \frac{\mathcal{H} \times s \times n}{(\rho + r + g)\, 10^8} = K\,0.$$

La constante K se determina como hemos dicho anteriormente y la relación (1) permite el cálculo del campo $\mathcal{H}$ en gauss

Permeámetros e histeresímetros. — Los permeámetros son aparatos que sirven para medir rápidamente los valores del coeficiente de permeabilidad de los metales, para inducciones dadas.

Permeámetro de Iliovici. — El permeámetro de Iliovici, construído por la «Compagnie pour la fabrication des compteurs», tiene la ventaja de regular antes

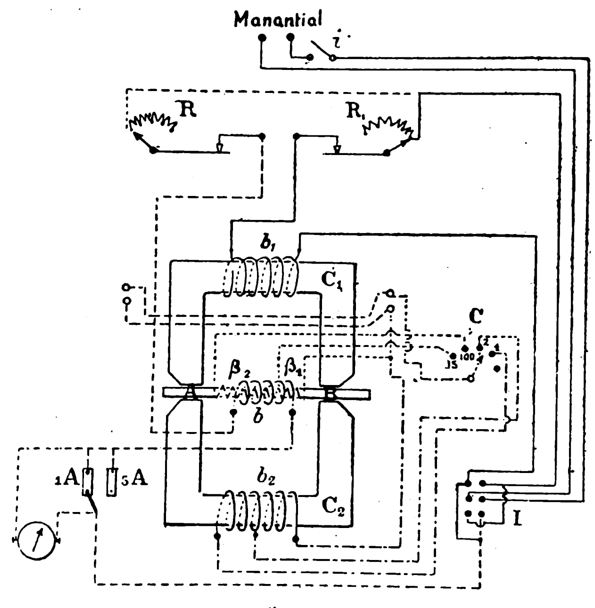


Fig. 194.

de su medida el valor del campo magnético en el cual se colocará la muestra estudiada; es de un empleo particularmente sencillo y da resultados exactos con todas las calidades de sustancias magnéticas. Está constituído, como indica el esquema (fig. 194), por dos culatas magnéticas C_1 y C_2 envueltas por los arrollamientos b_1 y b_2, entre las cuales se coloca la muestra de hierro que se estudia envuelta por una bobina b y

dos bobinas β_1 y β_2, una de ellas de 25 espiras y la otra de 100 espiras de sección S igual a 2,6 centímetros cuadrados.

La bobina b y la bobina b_1 van en derivación sobre un mismo manantial: en serie con b se halla el *reostato de campo* Rh compuesto de una parte con plots y de otra parte con variación continua y de dos shunts, uno de 1 ampere y otro de 5 amperes. En serie con b_1 va un *reostato de compensación* R_{h1}, compuesto como el R_h (corrientemente sólo es utilizada la parte de variación continua, quedando las manecillas sobre el plot 0, salvo el caso de campos muy débiles).

La bobina b_2 va unida por medio de un conmutador C de cinco plots a un fluxómetro o a un galvanómetro balístico; cuando la manecilla del conmutador se encuentra sobre el plot 1, el arrollamiento total de b_2 es utilizado, cuando está sobre el plot 2 no se liga a los aparatos (fluxómetro o balístico) más que una parte de este arrollamiento, lo que permite reducir la sensibilidad.

Dos bobinas β_1 y β_2, una de 25 espiras y otra de 100 espiras, envuelven igualmente la muestra estudiada y sus extremidades van unidas al fluxómetro o al balístico por los bornes 25 y 100 del conmutador C. Finalmente un conmutador I permite invertir al mismo tiempo la corriente en la bobina b y en la bobina b_1.

La muestra estudiada puesta bajo la forma de un paquete de chapas o de hierro macizo de 1 cm^2 aproximadamente de sección y de longitud igual o superior a 18 cm, es introducida en las bobinas b, β_1, β_2 y apretada entre las culatas C_1 y C_2 por medio de un tornillo y de una excéntrica.

Se comienza por graduar el campo al valor deseado; para ello, con el interruptor i cerrado, se deriva un milivoltímetro entre los bornes de uno de los shunts 1 A, 5 A, y se regula el reostato de campo R_h

hasta que se obtenga la intensidad correspondiente al valor que se desea para el campo.

Si I es la intensidad de esta corriente, el campo tiene por valor:

$$\mathcal{H} = \frac{4\,\pi\,NI}{10\,l}\ \text{gauss},$$

N, número de espiras de b, l longitud AB en centímetros.

Para simplificar, el milivoltímetro que acompaña al aparato va graduado directamente en gauss; es por consiguiente un gáussmetro graduado para el permeámetro.

Una vez alcanzado el valor deseado para el campo, se coloca la manecilla del conmutador C sobre el plot 1 o sobre el plot 2 y se regula, por el reostato R_{h1}, la corriente en b_1 de manera que el fluxómetro o el balístico no sufran desviación alguna cuando, por medio del inversor I, se invierta la corriente en b y en b_1. Cuando esta condición se realice, ninguna corriente atravesará la bobina b_2 y el flujo en la culata C_2 será nulo; por consiguiente, la diferencia de potencial magnético entre A y B será cero.

La fuerza magnetomotriz producida por la bobina b es $\frac{4\,\pi}{10} NI$, de manera que si la reluctancia de la muestra entre A y B es $\mathcal{R}$ y si el flujo en esta muestra es Φ, se tiene:

$$\frac{4\,\pi}{10} NI - \mathcal{R}\Phi = 0.$$

Ahora bien, el campo $\mathcal{H}$ dado por el gáussmetro es $\frac{4\,\pi}{10}\frac{NI}{l}$, de modo que:

$$\mathcal{H} = \frac{4\,\pi}{10}\frac{NI}{l} \quad \text{y} \quad \frac{4\,\pi}{10} NI = \mathcal{H}\,l;$$

por lo tanto:

$$\mathcal{H} l = \mathcal{R} \Phi.$$

Si μ es el coeficiente de permeabilidad del hierro correspondiente al campo $\mathcal{H}$, se tiene:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S},$$

siendo S la sección del hierro que suponemos de momento igual a la de las espiras de la bobina; resulta, pues:

$$\mathcal{H} l = \frac{l}{\mu S} \Phi,$$

o bien:

(1) $$\mathcal{H} = \frac{1}{\mu S} \Phi.$$

Determinación de Φ. — Para obtener el valor de Φ, se coloca la manecilla del conmutador C sobre uno de los plots 25 ó 100, manteniendo la corriente I en b, y se invierte la corriente por el inversor I. El fluxómetro o el balístico dan el valor de la variación del flujo a través de las bobinas β_1 o β_2. Si se ha puesto la manecilla de C sobre el plot 25, se ha utilizado la bobina β_1 de 25 espiras y el flujo ha pasado de 25 Φ a — 25 Φ, con lo que la variación habrá sido de 50 Φ; sea φ el valor dado por el fluxómetro. Se tiene:

$$\varphi = 50 \Phi, \qquad \text{o sea:} \qquad \Phi = \frac{\varphi}{50}.$$

Llevando este valor de Φ a la fórmula (1), se tiene:

$$\mathcal{H} = \frac{\varphi}{50 \mu S},$$

de donde:

$$\mu = \frac{\varphi}{50 \mathcal{H} S}.$$

Si se hubiera utilizado la bobina β_2 de 100 espiras, sería:

$$\mu = \frac{\varphi}{200\,\mathcal{H}S}.$$

Cuando se emplea el fluxómetro, está graduado de manera que una división corresponde a 10000 maxwells, o sea $\varphi = 10\,000\ \alpha$, y:

$$\mu = \frac{10\,000\,\alpha}{200\,\mathcal{H}S} = \frac{50\,\alpha}{\mathcal{H}S}$$

con la bobina β_2 de 100 espiras, y:

$$\mu = \frac{10\,000\,\alpha}{50\,\mathcal{H}S} = \frac{200\,\alpha}{\mathcal{H}S}$$

con la bobina β_1 de 25 espiras.

Cuando se utiliza el balístico es preciso graduarlo como se ha indicado en la página 216.

OBSERVACIÓN. — Hemos admitido que la sección de las espiras de β_1 y β_2 era igual a la sección S del hierro. Sin embargo, la sección de las espiras es de 2,6 cm², mientras que la del hierro es de 1 cm² aproximadamente.

Para la determinación de Φ, flujo a través del hierro, hemos dicho que el flujo a través de las 25 espiras de β_1 era 25 Φ y que cuando se invertía la corriente I la variación era de 50 Φ. En realidad el flujo a través de las espiras de β_1 se compone del flujo Φ a través del hierro de sección S y del flujo producido por el campo $\mathcal{H}$ a través de la porción de superficie de espiras $2{,}6 - S$, es decir:

$$25\,\Phi + 25\,\mathcal{H}(2{,}6 - S),$$

y será:

$$50\,\Phi + 50\,\mathcal{H}\,(2{,}6 - S) = \varphi,$$

de donde se deduce:

$$\Phi = \frac{\varphi - 50\,\mathcal{H}\,(2{,}6 - S)}{50}.$$

Llevando este valor a la igualdad (1) se tiene:

$$\mathcal{H} = \frac{\varphi - 50\,\mathcal{H}\,(2{,}6 - S)}{50\,\mu\,S},$$

$$\mu = \frac{\varphi - 50\,\mathcal{H}(2{,}6 - S)}{50\,\mathcal{H}\,S} = \frac{\varphi}{50\,\mathcal{H}\,S} - \frac{2{,}6 - S}{S}.$$

En el caso en que S sea igual a 1 cm²:

$$\mu = \frac{\varphi}{50\,\mathcal{H}} - 1{,}6.$$

Se ve que este valor es prácticamente igual a $\frac{\varphi}{50\,\mathcal{H}}$, a menos que el campo sea muy elevado. Para valores de campo superiores a 100 gauss, lo que es el caso más general, bastará tomar para μ solamente el primer término de la resta.

Fluxómetro. — El fluxómetro es un galvanómetro muy sensible, de cuadro móvil, cuyo par de torsión es despreciable frente al par de amortiguamiento en las condiciones de empleo, es decir, cuando la resistencia total del circuito que comprende el cuadro móvil es bastante pequeña (inferior a 30 ohms). El aparato construído por la «Compagnie pour la fabrication des compteurs», está construído de tal manera que un flujo de 10 000 maxwells dé una desviación de una división de la escala.

Los *histeresímetros* son aparatos que sirven para determinar las pérdidas por histeresis en un hierro, por comparación con las mismas pérdidas, en las mismas condiciones, en un trozo o pieza patrón que ha

sido estudiado por el método balístico que acabamos de exponer.

Estos aparatos están basados en el siguiente principio: sea un paquete de placas de palastro circulares agrupadas de modo que formen un cilindro de eje *O*, y en su interior un imán *NS* móvil alrededor de este eje. Si se someten las placas a un movimiento de rotación alrededor de *O*, el imán será arrastrado en el mismo sentido (figura 195). En efecto, consideremos en el paquete de placas un corte que vaya ocupando sucesivamente las posiciones *A*, *B*, *C*, *D*, *E*; la imanación de esta región crece desde *A* hasta *C*, y decrece de *C* a *E*, según el ciclo de histeresis *a b c d e*, de tal modo, que de *A* a *C* la imanación aumenta según la curva *a b c*, y de *C* a *E* disminuye según la curva *c d e*. Por consiguiente, la imanación de la región *C D E* es superior a la de la región *A B C*, y el imán sigue el movimiento del cilindro (fig. 196).

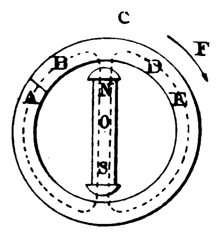


Fig. 195.

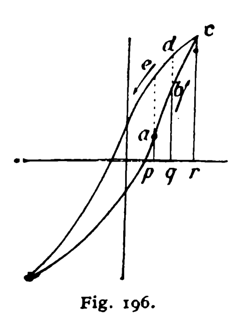


Fig. 196.

Se comprende fácilmente que si no hubiera histeresis la imanación sería la misma a una parte y a otra de los polos del imán, el cual, solicitado igualmente en los dos sentidos, permanecería inmóvil.

Si quisiéramos mantener inmóvil el imán, habría que aplicarle un par cuyo valor llamaremos *C*; claro está que entonces, para hacer girar el cilindro habría que aplicarle un par igual a *C*, y gastar un trabajo igual a $2\pi \times C$ por vuelta, y a $2\pi NC$ para *N* vueltas;

este trabajo representa la energía absorbida por las placas, por histeresis.

Si el volumen del cilindro es V cm³, y la inducción a que se somete el paquete de placas es $\mathcal{B}$, la energía gastada durante N vueltas es, según la fórmula de Steinmetz [1]:

$$\eta \mathcal{B}^{1,6} \times V \times N,$$

siendo η el coeficiente de Steinmetz.

Por consiguiente, se tiene:

$$2\pi N C = \eta \mathcal{B}^{1,6} V N,$$

de donde:

$$\eta = \frac{C \times 2\pi}{V \times \mathcal{B}^{1,6}}. \quad (1)$$

Se ve que este coeficiente es independiente de N, y por lo tanto, de la velocidad de rotación del cilindro.

OBSERVACIÓN. — El par C es independiente de la velocidad. Por consiguiente, si se hace girar el cilindro de hierro en el entrehierro de un imán, el par resistente es independiente de su velocidad; esta observación tiene su aplicación en un contador de la «Société des Compteurs».

Si se sustituyen estas placas por otras tipo, estudiadas de antemano, para las cuales se hayan determinado con cuidado las pérdidas por histeresis, y por lo tanto cuyo coeficiente de Steinmetz η' sea conocido, se podrá deducir el valor de η. Supongamos, en efecto, que el volumen V del cilindro tipo sea el mismo que el de las placas que se estudian, que la inducción $\mathcal{B}$ sea la misma para todas las clases de hierro ensayadas; si

[1] Tomo I, GENERALIDADES, pág. 150.

con las placas-tipo el par necesario para obtener el equilibrio del imán es C' se tendrá:

$$\eta' = \frac{C' \times 2\pi}{V \times \mathcal{B}^{1,6}}, \tag{2}$$

de donde:

$$\frac{\eta}{\eta'} = \frac{C}{C'}, \qquad \eta = \eta' \times \frac{C}{C'}.$$

La prueba consistirá en la medida de los pares C y C'. Para que la inducción sea independiente de la naturaleza de las muestras de palastro ensayadas, se procede de modo que la reluctancia de este palastro sea despreciable comparada con la del circuito magnético total; para ello, bastará tener un entrehierro suficientemente grande.

Del mismo modo se podría arrastrar el imán y aplicar a las placas el par que las dejaría inmóviles.

Histeresímetro Blondel-Carpentier. — El hierro que se trata de estudiar, cortado en forma de anillo de 38 mm. de diámetro interior y 55 mm. de diámetro exterior, se coloca sobre un soporte cilíndrico de modo que forme un espesor de 4 mm.; el soporte se monta sobre un árbol vertical, con lo cual la muestra del hierro que se ensaya está situada en el campo creado por un imán en U. Unas piezas polares que lleva el imán abrazan el anillo dejando

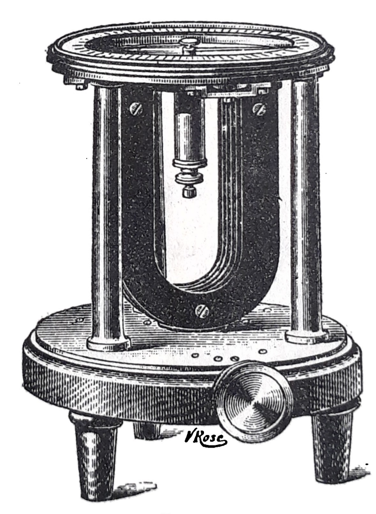


Fig. 197.
Histeresímetro Blondel-Carpentier.

un entrehierro de longitud suficiente para asegurar en el hierro una inducción prácticamente constante y de unos 10 000 gauss.

Con un manubrio colocado en la base del aparato, y mediante un disco y una rodaja se puede hacer girar el imán en U alrededor de un eje vertical (fig. 197).

El hierro tiende a ser arrastrado, pero un muelle helicoidal fijado al árbol vertical se opone a este movimiento y la torsión del muelle mide el par que obra sobre el hierro. Esta torsión se mide por un índice fijado sobre el árbol y un limbo graduado.

Se sustituyen las láminas que se ensayan por un cilindro de iguales dimensiones, formado con láminas de histeresis conocida. La relación entre las torsiones en ambos casos da la relación entre las pérdidas por histeresis.

EJERCICIOS

I. — Trazado de un ciclo de histeresis

a) Formar una corona de fundición que tenga la forma de la figura 198 y cuyas dimensiones estén medidas con toda exactitud. Su volumen será $\frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} h$ centímetros cúbicos.

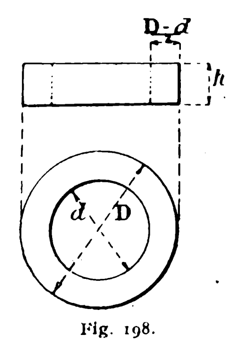


Fig. 198.

Se arrolla alrededor de esta corona un hilo grueso que pueda soportar una corriente de 10 amperes, y otro fino. Se hace el montaje indicado en la figura 191. Construir, como hemos dicho en la página 219, el ciclo de histeresis. Esta curva debe trazarse sobre papel cuadriculado en milímetros, es decir, sobre papel milimétrico.

Como abscisas se tomarán los valores del campo:

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi N I}{10\pi \frac{D+d}{2}} = \frac{4 N I}{5(D+d)},$$

donde N es el número de espiras del devanado de hilo fino; por ordenadas se tomarán los valores correspondientes de la inducción medida por el balístico

$$\left(s = \frac{D-d}{2} h\right).$$

Se mide la superficie del ciclo así trazado, teniendo en cuenta las escalas elegidas para las abscisas y las ordenadas.

Calcular la energía gastada por ciclo, en joules, y la energía gastada por centímetro cúbico, y deducir el coeficiente de Steinmetz η. Por logaritmos se calcula el valor de $\mathcal{B}^{1,6}$:

$$\log \mathcal{B}^{1,6} = 1{,}6 \log \mathcal{B}.$$

Se puede calcular directamente η por logaritmos, partiendo de la fórmula (1) de la página 219, del modo siguiente:

$$\log \eta = \log S + \mathrm{colog}\ 2 + \mathrm{colog}\ \pi + 1{,}6\ \mathrm{colog}\ \mathcal{B} - 7.$$

b) Repetir las mismas medidas y cálculos con un paquete de láminas de inducido en anillo.

II. — Estudio de un electroimán

Se toma un electroimán formado por una barra de hierro de sección rectangular, doblada en herradura, y cuya armadura sea una barra de la misma sección. Se mide la longitud l cm. de la línea de fuerza media, y la sección S cm^2 del hierro y se arrollan dos hilos B, B', cuyo número total de espiras es N. Hacer el montaje indicado

por la figura 199. Por los devanados se hace pasar una corriente I medida con el amperímetro A; resultando en el hierro un flujo Φ dado por la relación:

$$1,25\,NI = \left(\frac{l}{\mu S} + \frac{e}{S}\right)\Phi,$$

donde e es el espesor del aire entre la armadura y el núcleo (juntas).

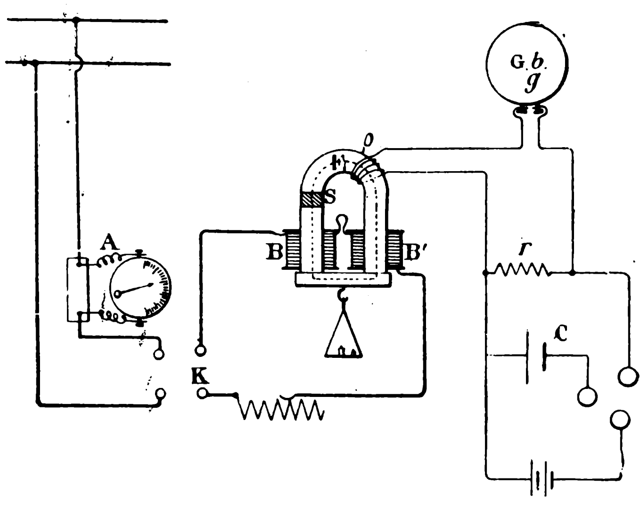


Fig. 199.

Si la inducción en el hierro es $\mathcal{B}$, se tiene:

$$\Phi = \mathcal{B}S,$$

de donde:

$$1,25\,NI = \left(\frac{l}{\mu S} + \frac{e}{S}\right)\mathcal{B}S,$$

o sea:

$$1,25\,NI = \left(\frac{l}{\mu} + e\right)\mathcal{B}.$$

Se puede tomar para l el valor aproximado de 0,1 mm.

Se mide $\mathcal{B}$ de los dos modos siguientes:

1.º Se carga la armadura hasta que se desprenda del imán, y sea P Kg. el peso necesario para conseguirlo; se sabe que:

$$P = \frac{1}{981} \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi \times 1\,000},$$

de donde se deduce el valor de $\mathcal{B}$.

2.º Se arrolla un hilo en unas cuantas espiras n, cuya superficie sea S, sobre el hierro del núcleo; la corriente I en los devanados B se invierte bruscamente por medio del inversor K. Sea θ la elongación producida en el galvanómetro balístico Gb; se tiene:

$$\frac{2\,\mathcal{B} \times n \times S}{r + \rho + g} = K\theta.$$

La constante K del galvanómetro se determina, como ya hemos dicho, por medio de un condensador de capacidad conocida C, y de una pila P de f. e. m. conocida E.

Calcular el valor de μ. Repetir las mismas medidas y los mismos cálculos para varios valores de la intensidad I.

III. — Medida de la inducción en el entrehierro de una dinamo

Se introduce en el entrehierro un carrete plano B del cual se conoce el número de espiras, la superficie abrazada por cada una de ellas y la resistencia.

Se aplica entre los extremos del circuito inductor la tensión normal y por medio del interruptor K se corta bruscamente la corriente en el circuito. El carrete B está unido a un galvanómetro balístico a través de una resistencia conocida r, por lo cual se produce en éste una desviación θ (fig. 200).

Habiendo sido graduado el galvanómetro mediante un condensador, se deduce de esta medida el valor de la inducción en el entrehierro.

Comprobar que esta inducción va creciendo a medida que el carrete va entrando entre las piezas polares.

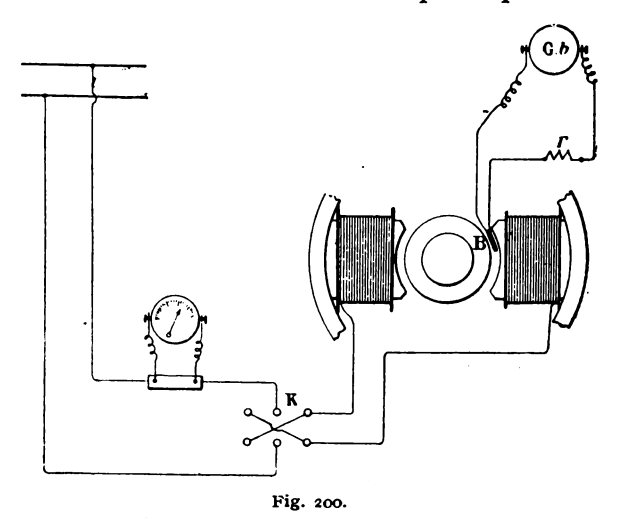


Fig. 200.

IV. — Medida del coeficiente de escape magnético de una dinamo

Se hace el montaje de la figura 201, donde B_1, B_2, B_3 son tres carretes de igual número de espiras n. Se empieza por excitar la máquina, y estando la maneta del conmutador C sobre el tope 1, se invierte de pronto la corriente de excitación por medio del inversor K, leyéndose la elongación producida θ_1. Si el flujo total emitido por los polos es Φ_1, se tiene:

$$\frac{2 \times \Phi_1}{\rho + r + g} = K\theta_1.$$

Como la resistencia ρ del pequeño número de espiras que componen el carrete B_1 es despreciable en comparación con r y g, se tiene:

$$(1) \qquad \frac{2\,\Phi_1}{r + g} = K\theta_1.$$

Se pone entonces la maneta del conmutador C sobre el tope 2 y se procede del mismo modo; si el flujo útil que atraviesa el inducido es Φ_2, se tiene:

$$(2) \qquad \frac{2\,\Phi_2}{r+g} = K\,\theta_2,$$

siendo θ_2 la elongación producida.

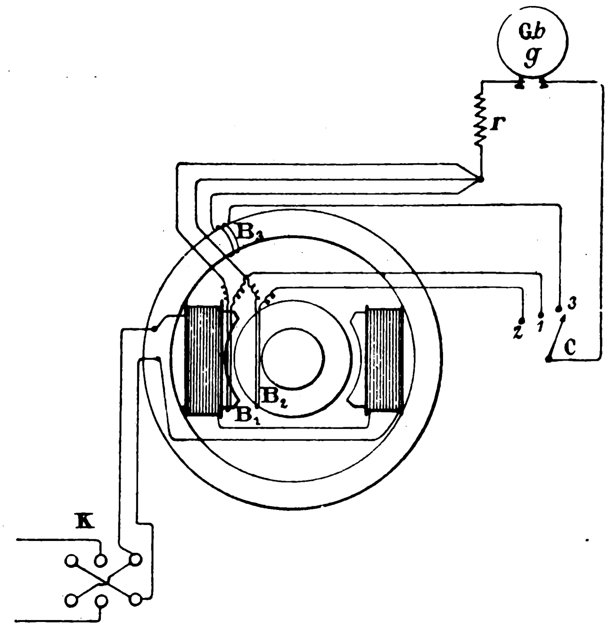


Fig. 201.

De las igualdades (1) y (2) se deduce:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{\theta_1}{\theta_2}.$$

La relación $\frac{\theta_2}{\theta_1}$ es el coeficiente de pérdida de flujo.

Finalmente, poniendo la maneta de C sobre el tope 3, se mide la relación $\frac{\Phi_1}{\Phi_3}$.

OBSERVACIÓN. — Cuando se trata de máquinas cuyo circuito inductor tenga un coeficiente de autoinducción bastante elevado, hay algunos inconvenientes en operar del modo que acabamos de indicar. La inversión de la corriente inductora y su ruptura pueden dar lugar a fuerzas electromotrices elevadas, peligrosas para el aislamiento; por otra parte, la duración del paso de la cantidad de electricidad inducida puede ser larga, de modo que el cuadro del galvanómetro balístico empieza a moverse antes que haya pasado toda esa cantidad, con lo cual las relaciones establecidas en la página 22 dejan de ser exactas.

Como, por otra parte, la inducción es bastante elevada para que se pueda despreciar el error ocasionado por el magnetismo remanente, es preferible proceder del modo siguiente, siempre que sea posible: se suspende el carrete pequeño de un hilo, y se le coloca en el entrehierro; se excita la máquina, y se tira bruscamente del hilo, con lo cual queda el carrete fuera del campo.

CAPÍTULO XI

Medidas referentes a las corrientes alternas

Medida de cantidades instantáneas. — *Ondógrafo de Hospitalier.* — Este aparato inscribe de un modo muy práctico sobre una tira de papel, curvas representativas de un fenómeno periódico, según el método de Joubert.

El órgano esencial del aparato consiste en un conmutador constituído por un cilindro metálico que tiene dos zonas aisladoras *DD'* representadas por las partes sombreadas de la figura 202. Este cilindro es movido por un motor sincrónico alimentado por el generador que se estudia, por medio de un tren de engranajes. Tres escobillas B_1, B_2, B_3 se apoyan sobre la superficie de este cilindro y van unidas a un condensador, a un galvanómetro balístico y al generador, como se ve en la figura. Los engranajes están calculados de modo que cuando el motor da 1 000 vueltas, el cilindro conmutador dé 999; el motor es de cuatro polos.

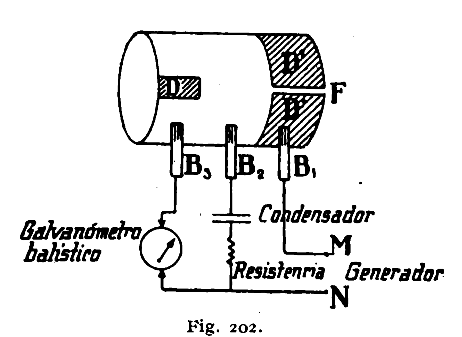


Fig. 202.

Sea, por ejemplo, una tensión alterna de frecuencia 50 aplicada entre los bornes *MN* del aparato: el motor gira con una velocidad de 25 vueltas por segundo y el cilindro dará $\frac{999 \times 25}{1000} = 24{,}975$ vueltas.

En un cierto momento, la escobilla B_1 está sobre la parte conductora *F* del cilindro, al mismo tiempo que B_3 está sobre la parte aisladora *D*, estando B_2 constantemente apoyada sobre la masa conductora; la tensión entre los bornes *MN* está dada entonces por la ordenada *PK* de la curva que representa las variaciones de la tensión con el tiempo (fig. 203). Por consi-

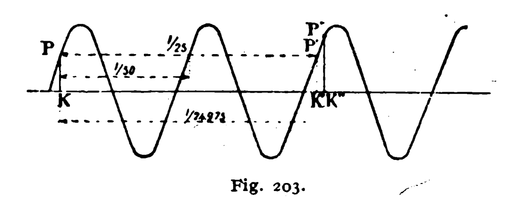


Fig. 203.

guiente, el condensador toma una carga proporcional a esta tensión *PK*. Inmediatamente después de esta carga, la escobilla B_1 pasa a apoyarse sobre la parte aisladora *D'* y B_3 sobre la masa conductora, de modo que el balístico recibe una impulsión. Al cabo de $^1/_{25}$ de segundo después, el motor habrá dado una vuelta y la tensión habrá vuelto a adquirir el valor anterior después de dos períodos, valor dado por $P'K' = PK$; pero el cilindro habrá dado una vuelta completa un poco después, es decir, $^1/_{24{,}975}$ de segundo después. La tensión es entonces $P''K''$, ligeramente mayor que PK; en este instante B_1 ha vuelto a *F* y el condensador se vuelve a cargar para descargarse inmediatamente en el balístico, que recibe una impulsión algo superior a la primera, y así sucesivamente, de modo que el cua-

dro del galvanómetro experimenta una serie de impulsiones proporcionales a las ordenadas de la curva que expresa gráficamente las variaciones de la tensión alterna.

El intervalo entre dos descargas es menor que el período de oscilación del galvanómetro, de modo que el cuadro conserva la posición que toma por efecto

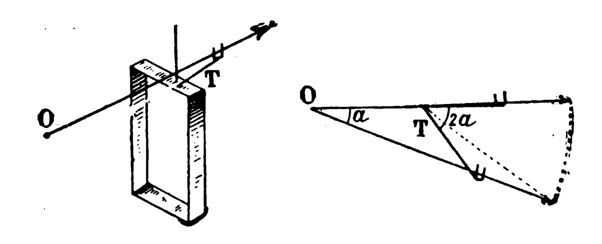


Fig. 204.

de una descarga, hasta que una nueva descarga, un poco mayor que la anterior, produce una desviación mayor.

De esta manera, el extremo de la aguja; que lleva el cuadro, avanza en longitudes proporcionales a las tensiones entre M y N.

La curva que traduce las variaciones de la tensión queda marcada por una palanca unida al cuadro; para amplificar suficientemente el movimiento sin ocasionar un excesivo rozamiento, la palanca es movida como indica la figura 204. Sobre el cuadro hay fijada una varilla ligera T terminada en una horquilla entre cuyos brazos pasa una palanca inscriptora que puede oscilar alrededor del punto O y que está completamente separ· la del cuadro. La palanca tiene una longitud doble que la varilla T, de tal modo que cuando el cuadro gira en un cierto ángulo a la

palanca gira un ángulo doble, pero su extremo describe un arco de igual longitud que el que describiría si esta palanca estuviera por su punto medio unida al cuadro.

Antes de cerrar el interruptor que pone en comunicación el motor sincrónico con los bornes conectados

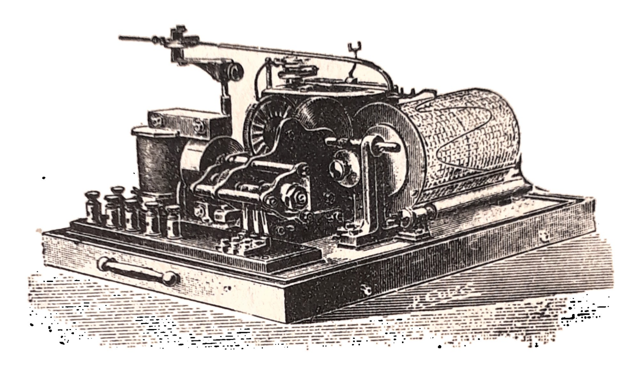


Fig. 205. — Ondógrafo de Hospitalier.

al generador, hay que lanzarlo a la velocidad de sincronismo, para lo cual una lámpara alimentada por el generador ilumina una de las ruedas dentadas que lleva sectores blancos y negros (fig. 205). Se hace girar lentamente la manivela, acelerando cada vez más el movimiento hasta que los sectores blancos y negros parezcan inmóviles, y en este momento se cierra el interruptor y se quita la manivela. Con un poco de costumbre se puede prescindir de la lámpara poniendo en circuito el motor en el instante en que la aguja del galvanómetro toma un movimiento lento y regular.

El motor está unido directamente al generador, de tensión igual a 110 volts y frecuencia 50; para frecuencias de 25 bajo tensiones de 110 volts, y frecuencias de 50 bajo 220 volts, se pone una autoinducción en serie con el motor por medio de un conmutador, que

permite alimentar el motor directamente con el generador, o alimentarlo a través de la autoinducción,

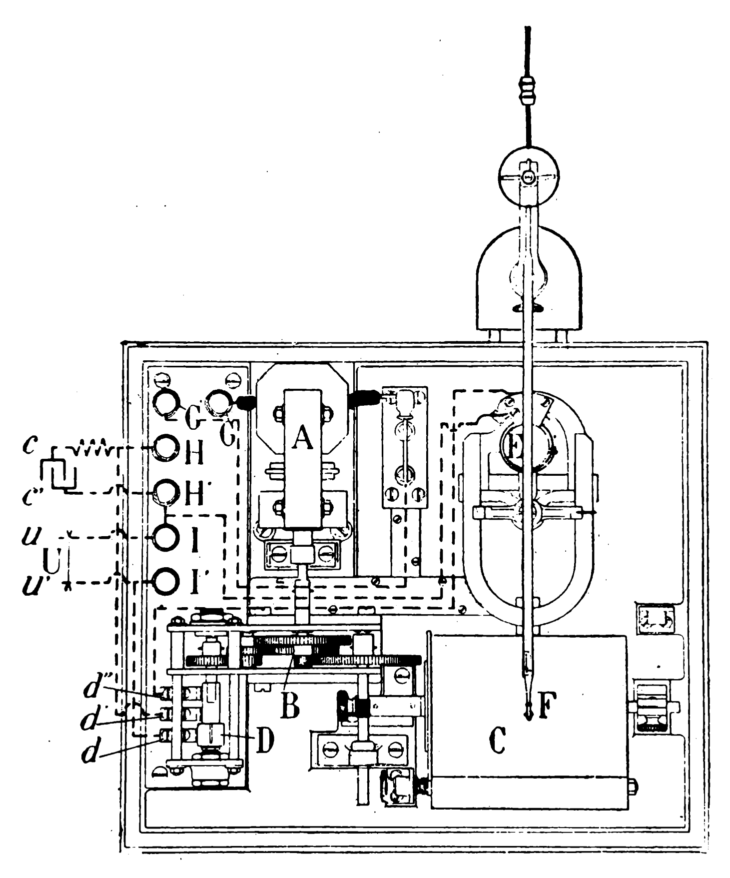


Fig. 206.

o separarlo del generador, y en este caso sirve de interruptor.

El condensador no forma parte del aparato, estando conectado al mismo por medio de una resistencia sufi-

ciente para evitar las chispas en la escobilla de carga, y está dispuesto en la base o zócalo del aparato. La capacidad c microfarads de este condensador depende de la diferencia de potencial u y de la frecuencia f del generador, y debe ser tal que el producto $f \times c \times u$ ha de estar comprendido entre 2 000 y 2 500; por ejemplo, para $u = 110$ volts y $f = 50$, se tendrá:

$$c \times 110 \times 50 = 2000,$$

de donde,

$$c = 0,5 \text{ microfarads aproximadamente.}$$

Las tensiones elevadas deben reducirse a 110 ó 220 volts por medio de un transformador. La velocidad de rotación del tambor es tal que en el papel quedan trazados tres períodos.

En la figura 206 se ve la disposición esquemática del ondógrafo de Hospitalier: A es el motor, cc' el condensador, HH' sus bornes, D el tambor, d, d', d'' las escobillas, B el tren de engranajes, E el galvanómetro, C el cilindro registrador, GG' los bornes de alimentación del motor e II' los del generador.

Medida de las intensidades eficaces. — Para medir las intensidades alternas no se pueden emplear los amperímetros de imán móvil y cuadro fijo, ni los amperímetros de imán fijo y cuadro móvil, porque en estos aparatos el par director que obra sobre la parte móvil cambia de sentido al mismo tiempo que la corriente.

Si la frecuencia es pequeña, y si la parte móvil tiene un pequeño momento de inercia, la aguja del aparato seguirá las variaciones de la corriente. Ahora bien, las corrientes industriales tienen una frecuencia de 25 a 50 períodos por segundo, de modo que como la parte móvil de los amperímetros tiene siempre una

cierta inercia, el cambio de sentido del par se produce antes de que dicha parte móvil se haya movido, y la aguja no sale del cero.

Por consiguiente, hay que emplear aparatos en los cuales el par que obra sobre la parte móvil no cambie de sentido cuando se invierte la corriente. Hay tres tipos de aparatos que cumplen con esta condición.

a) *Amperímetro electromagnético de hierro dulce.* — Este instrumento está constituído por un cuadro fijo recorrido por la corriente que se trata de medir; en el interior del cuadro hay una aguja de hierro dulce que se imana bajo la influencia del campo creado por la corriente, y que es orientada por este campo. Un muelle o un contrapeso oponen un par antagonista. Si el sentido de la corriente cambia, el sentido de la imanación de la aguja cambia al mismo tiempo, de modo que la acción del campo sobre esta aguja conserva el mismo sentido.

Estos aparatos son poco recomendables, porque se originan corrientes de Foucault en el hierro que hacen disminuir su imanación media. Si únicamente se dispone de esta clase de aparatos, hay que graduarlos con corrientes alternas de igual frecuencia que la que se trata de medir, no pudiéndose hacer esta graduación con corriente continua.

Estos aparatos son muy fuertes; pero las desviaciones de la aguja no son exactamente proporcionales a las corrientes, no pudiéndose empezar a utilizar sus indicaciones sino a partir de $^1/_4$ del valor máximo de la graduación. Sin embargo, algunos constructores han logrado con ciertos artificios de construcción hacer las desviaciones aproximadamente proporcionales a las corrientes eficaces en gran parte de la escala graduada.

b) *Amperímetros térmicos.* — Se sabe que si un hilo de resistencia R es recorrido por una corriente

alterna I_{ef}, la cantidad de calor producida por segundo en esta resistencia tiene por valor $RI^2_{ef} \times 0{,}24$ calorías; bajo la influencia de esta cantidad de calor la temperatura de este hilo se eleva, su longitud aumenta y estas variaciones de longitud pueden servir para medir la intensidad de la corriente que lo recorre.

Los amperímetros térmicos están formados principalmente por un conductor recorrido por las corrientes que se quieren medir; sus variaciones de longitud se amplifican y se trasmiten a una aguja que se mueve delante de una escala graduada.

Las desviaciones son aproximadamente proporcionales a los cuadrados de la corriente, y únicamente pueden utilizarse en las dos terceras partes de la graduación total. Estos instrumentos son aperiódicos, pero llegan con bastante lentitud a su posición de equilibrio; tienen el inconveniente de absorber una energía considerable. Sus indicaciones son independientes de la frecuencia de la corriente, y por lo tanto, pueden graduarse con la corriente continua. Ordinariamente se derivan entre los extremos de un shunt, excepto para las pequeñas intensidades.

c) *Amperímetros electrodinámicos.* — Estos amperímetros no son más que electrodinamómetros, y ya hemos visto que en estos aparatos las desviaciones son proporcionales al cuadrado de la corriente que los atraviesa; el sentido de la desviación es independiente del de la corriente, lo cual proviene de que el cambio de sentido de la corriente se produce en los dos carretes que componen el aparato, con lo que no se modifica el sentido de la acción recíproca entre ambos carretes.

Como la parte móvil tiene una cierta inercia, toma una posición de equilibrio bajo la influencia del valor medio del cuadrado de la corriente durante un semiperíodo. Por consiguiente, bastará escribir frente al

índice el valor de la corriente continua que daría la misma desviación, y se tendrá el valor de la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de la corriente durante un semiperíodo, es decir, el valor eficaz.

Se comprende que es preciso evitar en la construcción de estos aparatos la presencia de masas conductoras macizas, en las cuales podrían inducirse corrientes de Foucault.

El par electrodinámico puede equilibrarse con un hilo de torsión como en el electrodinamómetro, o mejor aun con pesos, como en las balanzas de lord Kelvin.

Medida de grandes intensidades. — Cuando se trata de medir grandes intensidades, no se deriva directamente el amperímetro en el circuito, sino que se hace pasar la corriente que se mide por el primario de un transformador de medida, cuyo secundario está unido al amperímetro.

El circuito primario está constituído por varias espiras de hilo grueso; sea n el número de estas espiras; si N es el número de espiras del secundario, la corriente medida tendrá por valor:

$$I = i \times \frac{N}{n},$$

donde i es la intensidad dada por el amperímetro.

Medida de las tensiones eficaces. — Se miden estas tensiones con voltímetros construídos como los amperímetros que acabamos de describir, o con un electrómetro (véase voltímetro electrostático, pág. 122). Cuando se emplea un voltímetro térmico, hay que ponerle en serie una resistencia conveniente, facilitada por el constructor al mismo tiempo que el voltímetro.

Medida de las potencias.—Sea un circuito recorrido por una corriente alterna de valor eficaz I; la diferencia de potencial entre sus extremos tiene por valor eficaz U, y sea φ el defasaje de la corriente sobre la d. d. p.; se sabe que la potencia gastada en este circuito tiene por valor:

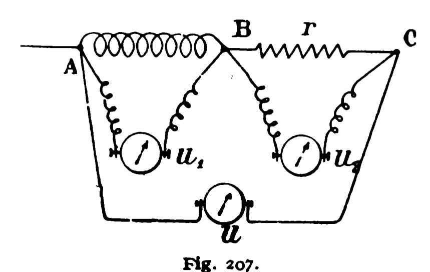


Fig. 207.

$$W = UI \cos \varphi$$

La dificultad consiste en que generalmente no se conoce el factor cos φ.

Método de los tres voltímetros. — Sea un circuito de utilización AB; se coloca en serie con este circuito una resistencia sin autoinducción r, y se miden con un voltímetro, o con tres voltímetros, las d. d. p. eficaces entre los extremos AB, BC y AC (fig. 207).

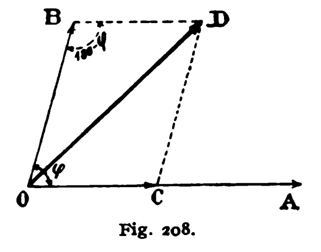


Fig. 208.

Sean U_1, U_2, U estos valores, y u_1, u_2 y u los valores instantáneos de estas d. d. p. Se tendrá:

$$u = u_1 + u_2.$$

Tomemos como origen de las fases el de la corriente, y sea $OA = I_{ef}$.

La tensión u_1 está defasada sobre I en un ángulo φ, en adelanto (si el defasaje es debido a la autoinducción), o sea $OB = U_{1ef}$. La tensión u_2 está en concordancia de fase con I, y sea $OC = U_2$, $OC = rI$.

U estará dada por la diagonal OD del paralelogramo construído sobre OC y OB (fig. 208).

El triángulo OBD da la relación:

$$OD^2 = OB^2 + BD^2 - 2\, OB \times BD \times \cos OBD.$$

Ahora bien:

$$OBD = 180^\circ - \varphi, \quad \text{y} \quad \cos OBD = -\cos \varphi;$$

luego:

$$U^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2\, U_1 U_2 \cos \varphi,$$

de donde:

$$\cos \varphi = \frac{U^2 - U_1^2 - U_2^2}{2\, U_1 U_2};$$

y como $W = U_1 I \cos \varphi$, se tendrá, sustituyendo $\cos \varphi$ por el valor anterior, e I por $\frac{U_2}{r}$:

$$W = U_1 \times \frac{U_2}{r} \times \frac{U^2 - U_1^2 - U_2^2}{2\, U_1 U_2}$$

y finalmente:

$$W = \frac{1}{2\, r} (U^2 - U_1^2 - U_2^2).$$

Método de los tres amperímetros. — Se pone una resistencia no inductiva en derivación sobre el circuito

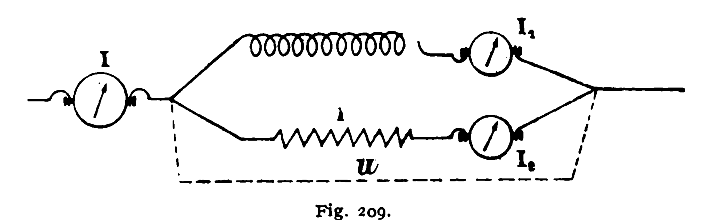


Fig. 209.

de utilización y tres amperímetros, de los cuales uno mide la corriente total y los otros dos las corrientes en cada una de las derivaciones (fig. 209).

Sean I, I_1, I_2 las intensidades eficaces dadas por

estos aparatos, e i, i_1, i_2 sus valores instantáneos. Se tendrá:

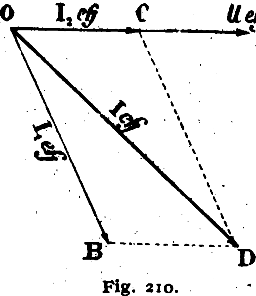


Fig. 210.

$$i = i_1 + i_2,$$

y se ve, como anteriormente, tomando por fase inicial la de la tensión u, que I está medida por la diagonal OD del paralelogramo construído sobre OC y OB, que forman entre sí un ángulo φ, y cuyas longitudes respectivas miden I_1 e I_2 (fig. 210).

En el triángulo OBD se tiene:

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2\, I_1 I_2 \cos \varphi,$$

de donde:

$$\cos \varphi = \frac{I^2 - I_1^2 - I_2^2}{2\, I_1 I_2}.$$

Por otra parte, se tiene:

$$I_2 = \frac{U}{r};$$

y como $W = UI_1 \cos \varphi$, resulta:

$$W = r I_2 I_1 \frac{I^2 - I_1^2 - I_2^2}{2\, I_1 I_2},$$

o sea:

$$W = \frac{r}{2} (I^2 - I_1^2 - I_2^2) \text{ watts.}$$

Wattímetro. — Si se coloca un wattímetro de modo que el devanado de hilo grueso sea recorrido por la corriente que alimenta al circuito de utilización y el devanado de hilo fino esté colocado en derivación entre los extremos de este circuito, este aparato indicará el valor $UI \cos \varphi$. En efecto, el devanado de hilo fino es

recorrido por una corriente cuyo valor instantáneo es:

$$i' = \frac{u}{R},$$

siendo u la d. d. p. instantánea y R la resistencia del carrete móvil y de su resistencia adicional. Si i es el valor instantáneo de la corriente en el hilo grueso, el par electrodinámico resultante de la acción de estas dos corrientes es:

$$C = K_1 i i'.$$

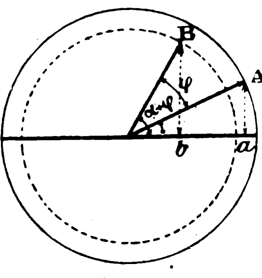


Fig. 211.

Vamos a determinar el valor medio de este par. Sea OA una posición del vector de magnitud I_{max} correspondiente a la fase α de la corriente en el instante t. Se sabe que en este instante el valor de la corriente está dado por la proyección Oa de OA; la tensión u está defasada en un ángulo φ sobre i, de modo que cuando la fase de i es α, la de u es $\alpha + \varphi$, y u estará medida por la proyección Ob del vector OB (figura 211).

El par electrodinámico en el instante considerado es, por consiguiente:

$$C = K_1 \times Oa \times Ob.$$

Ahora bien:

$$Oa = I_{max} \cos \alpha$$

$$Ob = U_{max} \cos (\alpha + \varphi);$$

luego:

$$C = K_1 U_{max} I_{max} \cos \alpha \cos (\alpha + \varphi);$$

pero se sabe que (1)

$$\cos \alpha \cos (\alpha + \varphi) = \frac{\cos \varphi + \cos (2\alpha + \varphi)}{2};$$

por lo tanto,

$$C = K_1 U_{max} I_{max} \frac{\cos \varphi + \cos (2\alpha + \varphi)}{2},$$

o sea:

$$C = K_1 \frac{U_{max} I_{max} \cos \varphi}{2} + K_1 \frac{U_{max} I_{max} \cos (2\alpha + \varphi)}{2}.$$

Es decir, que el valor instantáneo del par está formado de dos partes: la primera es constante, independiente del tiempo, puesto que la fase α no entra en su valor; la segunda es función del tiempo.

El valor medio de la primera es igual a su valor instantáneo, por ser constante, es decir, igual a:

$$K_1 \frac{U_{max} I_{max} \cos \varphi}{2},$$

o sea,

$$K_1 \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \cos \varphi = K_1 E_{ef} I_{ef} \cos \varphi.$$

---

(1) En efecto, se tiene:

$$\cos (a + b) = \cos a \cos b - \operatorname{sen} a \operatorname{sen} b$$
$$\cos (a - b) = \cos a \cos b + \operatorname{sen} a \operatorname{sen} b,$$

de donde:

$$\cos (a + b) + \cos (a - b) = 2 \cos a \cos b$$
$$\cos a \cos b = \frac{\cos (a + b) + \cos (a - b)}{2}$$

y poniendo $a = \alpha$ y $b = \alpha + \varphi$, se tiene:

$$\cos \alpha \cos (\alpha + \varphi) = \frac{\cos (\alpha + \alpha + \varphi) + \cos (\alpha + \varphi - \alpha)}{2} = \frac{\cos \varphi + \cos (2\alpha + \varphi)}{2}.$$

La segunda parte tiene por valor medio:

$$K_1 \frac{U_{max} I_{max}}{2} \times \text{valor medio de } \cos(2\alpha + \varphi).$$

Pero el valor medio de cos $(2\alpha + \varphi)$, que es el valor medio de las ordenadas de una sinusoide, es cero. Por lo tanto, el valor medio del par electrodinámico es:

$$K_1 U_{ef} I_{ef} \cos \varphi.$$

Por efecto de este par, el hilo de suspensión sufre una torsión igual al ángulo β, dando lugar a un par de torsión $K_2\beta$. Cuando estos dos pares son iguales se tiene el equilibrio, y entonces se verifica la siguiente igualdad:

$$K_1 U_{ef} I_{ef} \cos \varphi = K_2 \beta,$$

de donde:

$$U_{ef} I_{ef} \cos \varphi = \frac{K_2}{K_1} \beta,$$

o sea:

$$U_{ef} I_{ef} \cos \varphi = K \beta.$$

De este modo se ve que el wattímetro da el valor de la potencia gastada en el circuito.

Medida de la potencia absorbida por un sistema polifásico

a) **Circuito bifásico.** — Si los dos circuitos son independientes (cuatro hilos) bastará medir la potencia tomada por cada uno de ellos, considerado como circuito monofásico, sumando después los resultados obtenidos.

En el caso de una distribución por tres hilos, basta colocar los hilos gruesos de dos wattímetros en cada

uno de los hilos extremos y los hilos finos entre el hilo común y cada uno de los extremos (fig. 212).

b) **Circuito trifásico.** — 1.º *Montaje en estrella.* — Sean i_1, i_2, i_3 los valores instantáneos de las corrientes

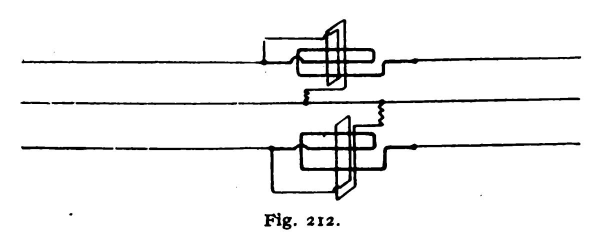


Fig. 212.

en las tres fases; u_1, u_2, u_3 las d. d. p. entre el centro de la estrella y cada uno de los extremos de los circuitos.

El valor instantáneo de la potencia tomada por el circuito es:

$$u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3.$$

La potencia que se trata de medir es:

valor medio de $u_1 i_1$ + val. medio de $u_2 i_2$ + val. medio de $u_3 i_3$.

Esta potencia se obtiene mediante tres wattímetros

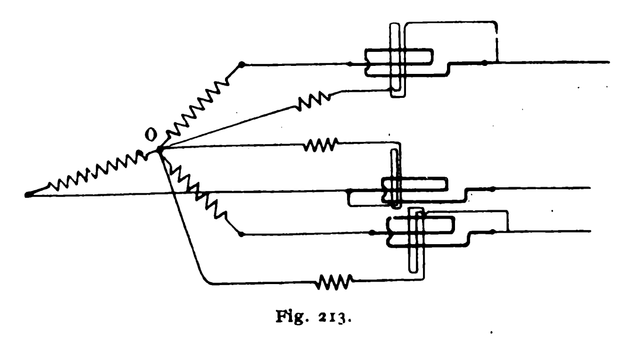


Fig. 213.

cuyos hilos gruesos estén colocados en las líneas y los hilos finos entre el centro de la estrella y cada una

de las líneas (fig. 213). La suma de las indicaciones de estos tres wattímetros dará la potencia medida.

Si las tres fases están igualmente cargadas, bastará un solo wattímetro, del cual se triplicará su indicación. Cuando hay que medir la potencia absorbida por un circuito de esta clase *cuyo centro sea inaccesible* (en un motor, por ejemplo), no se puede emplear el método anterior: es necesario en este caso hallar un procedimiento que permita medir la potencia absor-

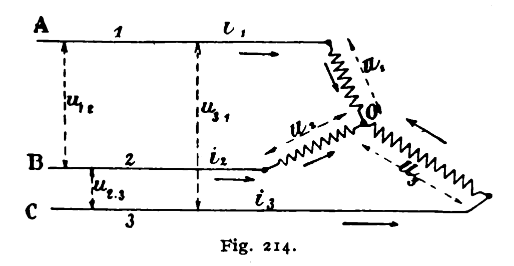


Fig. 214.

bida no utilizando más que las corrientes en las líneas y las d. d. p. entre estas líneas.

CASO EN QUE EL CENTRO ES INACCESIBLE. — Sean u_{12}, u_{23}, u_{31} las d. d. p. entre las líneas *A*, *B* y *C*; i_1, i_2, i_3 las corrientes en valores instantáneos (fig. 214).

Se sabe que:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

y que:

$$u_{12} = u_1 - u_2$$
$$u_{23} = u_2 - u_3$$
$$u_{31} = u_3 - u_1.$$

El valor instantáneo de la potencia medida es:

$$W = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3.$$

Sustituyendo i_1 por $-i_2 - i_3$, se tiene:

$$W = -u_1 i_2 - u_1 i_3 + u_2 i_2 + u_3 i_3$$
$$W = i_2(u_2 - u_1) + i_3(u_3 - u_1).$$

Ahora bien:

$$u_2 - u_1 = -u_{12}, \qquad u_3 - u_1 = u_{31};$$

luego:

$$W = -u_{12}i_2 + u_{31}i_3 = u_{21}i_2 + u_{31}i_3,$$

es decir, que:
la potencia total media = valor medio de $u_{12}i_2$ + valor medio de $u_{31}i_3$.

El valor medio de $u_{12}i_2$ se obtiene haciendo que pase la corriente por el hilo grueso y aplicando en los

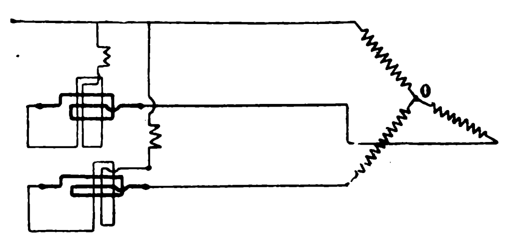


Fig. 215.

extremos del hilo fino la d. d. p. u_{12}. Del mismo modo, el valor medio de $u_{31}i_3$ se obtiene haciendo pasar por el hilo grueso la corriente i_3 y aplicando en los extremos del hilo fino la d. d. p u_{31}. La suma de las indicaciones de los dos wattímetros dará el valor de la potencia que se mide.

El montaje es el indicado esquemáticamente por la figura 215.

2.º *Montaje en triángulo.* — Sean i_1, i_2, i_3 las corrientes en las líneas; i_{12}, i_{23}, i_{31}, las corrientes en los circuitos que componen el triángulo, y u_{12}, u_{23}, u_{31} las d. d. p. entre los bornes del triángulo, o entre las líneas (fig. 216). Entre estos valores instantáneos se tienen las relaciones:

$$(1) \qquad \begin{aligned} i_1 &= i_{12} - i_{31} \\ i_2 &= i_{23} - i_{12} \\ i_3 &= i_{31} - i_{23}. \end{aligned}$$

Pero por otra parte, se sabe que:

(2) $$u_{12} + u_{23} + u_{31} = 0.$$

Luego la potencia instantánea tiene por valor:

$$W = u_{12} i_{12} + u_{23} i_{23} + u_{31} i_{31}.$$

De la igualdad (2) se deduce:

$$u_{12} = - u_{23} - u_{31};$$

por consiguiente:

$$W = - u_{23} i_{12} - u_{31} i_{12} + u_{23} i_{23} + u_{31} i_{31};$$

o sea:

$$W = u_{23} (i_{23} - i_{12}) + u_{31} (i_{31} - i_{12}).$$

Según las relaciones (1), se tiene:

$$i_{31} - i_{12} = - i_1 \quad \text{e} \quad i_{23} - i_{12} = i_2;$$

luego:

$$W = u_{23} i_2 - u_{31} i_1, \quad \text{o sea:} \quad W = u_{23} i_2 + u_{13} i_1,$$

valor medio de W = valor medio de $u_{23} i_2$ + valor medio de $u_{31} i_1$.

De aquí se deduce que el procedimiento consistirá en hacer pasar por el hilo grueso del wattímetro la

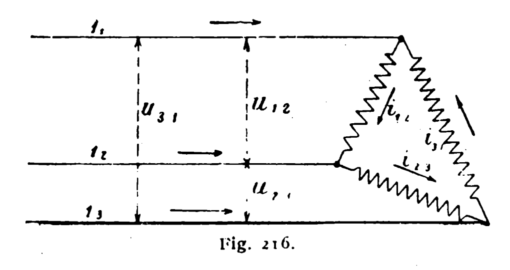


Fig. 216.

corriente i_2 y aplicar en los extremos del hilo fino la d. d. p. u_{23}; el hilo grueso del segundo wattímetro será atravesado por la corriente i_1, y su hilo fino estará

dispuesto de modo que la tensión u_{31} esté aplicada en sus extremos.

La suma de las indicaciones de los dos wattímetros dará la potencia utilizada.

El montaje es el que esquemáticamente representa la figura 217.

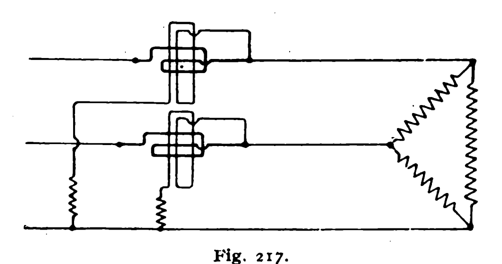


Fig. 217.

OBSERVACIÓN I. — Se ve que cuando se trata de medir la potencia gastada en un circuito trifásico por este método de los dos wattímetros, no es necesario saber si el montaje está hecho en estrella o en triángulo.

Se coloca el hilo grueso de los dos wattímetros en dos cualesquiera de los hilos de línea, y su hilo fino se une al tercer hilo de línea. La suma de las indicaciones de los dos wattímetros da la potencia medida.

OBSERVACIÓN II. — Puede suceder, en el caso de un gran defasaje (superior a 60°), que la potencia dada por uno de los wattímetros deba restarse de la dada por el otro, en vez de ser sumada. Para saber si hay que sumar o restar las indicaciones se procede del modo siguiente: se coloca sobre el circuito de hilo grueso de cada wattímetro un inversor que permite cambiar el sentido de la corriente en este devanado. Hecho esto, se coloca primero uno de los wattímetros como ya se ha indicado, por ejemplo, el hilo grueso en i_2 y el hilo fino entre i_2 e i_3.

Se busca la posición del inversor para la cual la aguja se desvíe en el sentido debido. El segundo wattímetro se coloca después en la misma posición que el primero y se determina la posición del inversor que dé una desviación en el sentido conveniente. Se pone entonces este segundo wattímetro en la posición que debe ocupar, es decir, el hilo grueso en i_1, y el fino entre i_1 e i_3, conservando la disposición anterior del inversor.

Si en estas condiciones la desviación se verifica en el sentido debido, hay que sumar las indicaciones de los dos wattímetros. Al contrario, si tiene lugar en sentido distinto, se vuelve la maneta del inversor y se lee la indicación de la aguja, restándola de la del primer wattímetro.

OBSERVACIÓN III. — Se puede hacer esta medida con un solo wattímetro mediante un conmutador, con el cual, sin cortar la corriente, se puede pasar el wattímetro sucesivamente por cada una de las dos fases (figura 218).

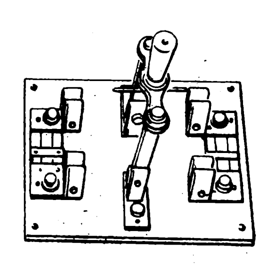


Fig. 218.

Este conmutador tiene dos cuchillas aisladas entre sí y unidas solidariamente una a otra, móviles alrededor de los ejes A, A', y que pueden unirse por dos bornes con el hilo grueso del wattímetro. Las dos cuchillas pueden ocupar las posiciones C_1 C'_1 (fig. 219) o las posiciones C_2 C'_2 (fig. 220). Cuando ocupan la posición C_1 C'_1 una varilla unida al mango de la palanca que las acciona levanta la lámina L_1, que corta la comunicación entre los bornes B_1 y B'_1, mientras que los bornes B_2 y B'_2, quedan en comunicación entre sí. Si se vuelve el inversor, las cuchillas pasan a ocupar

las posiciones C_2 C'_2 y los bornes B_1 B'_1, quedan unidos, mientras que B_2 y B'_2 quedan incomunicados.

Las conexiones están establecidas como indican las figuras 219 y 220, viéndose que es posible con un solo

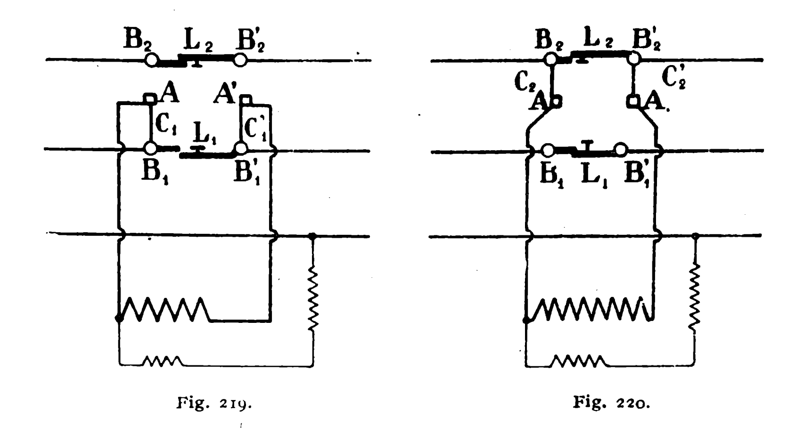


Fig. 219.

Fig. 220.

wattímetro medir la potencia tomada por un circuito trifásico.

Medida, con un solo wattímetro, de la potencia tomada por un receptor trifásico de tres hilos equilibrado. — Se crea un punto neutro artificial por medio de tres resistencias iguales montadas en estrella. Sean 1, 2, 3, las tres líneas que alimentan al receptor; se coloca el hilo grueso en una cualquiera de estas líneas, 1 por ejemplo; las otras líneas 2 y 3 están unidas a un mismo punto O por medio de dos resistencias iguales r, y el extremo del hilo fino del wattímetro se une a este mismo punto O a través de una resistencia tal que su valor r' sumado al de la resistencia del circuito de hilo fino ρ sea igual a r (fig. 221). Basta triplicar entonces la indicación del wattímetro.

Se pueden disponer también los tres devanados

como indica esquemáticamente la figura 222. En este caso se tiene:

$$r = \frac{r'\rho}{r' + \rho}.$$

Los constructores facilitan, al entregar el wattímetro, una caja de tres resistencias agrupadas como se ve en la figura 221, o como representa la figura 222.

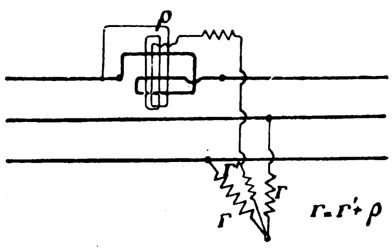


Fig. 221.

Wattímetros de inducción.—Estos aparatos dan, con una sola lectura, la potencia absorbida por un receptor trifásico. Están constituídos por un disco de aluminio móvil alrededor de un eje que lleva una aguja; el disco está sometido a un par que tiende a hacerlo girar, y que es producido por un campo giratorio creado por carretes, cuyos flujos están convenientemente defasados.

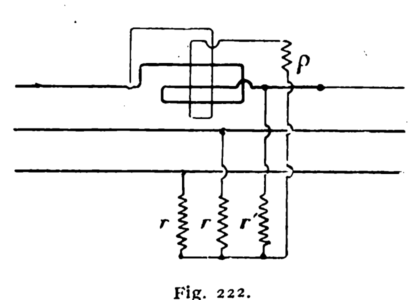


Fig. 222.

El campo induce corrientes en el disco, y el par está originado por la acción de estas corrientes sobre el campo. Este par está equilibrado por un muelle antagonista.

El montaje de los carretes puede hacerse siguiendo el método de los dos wattímetros; en realidad se tienen dos wattímetros que producen dos pares que actúan sobre el mismo disco, y que se suman.

Dos carretes de hilo grueso están en dos hilos de línea, y dos carretes de hilo fino están derivados entre los hilos de línea, como se ve en la figura 223 (véase contadores polifásicos de campo giratorio, pág. 279). Cuando se emplean transformadores de medida, el montaje es el indicado por la figura 224, donde T_i son los transformadores de intensidad y T_p el de potencial. La comprobación de las conexiones puede hacerse como se hace para los contadores (pág. 287).

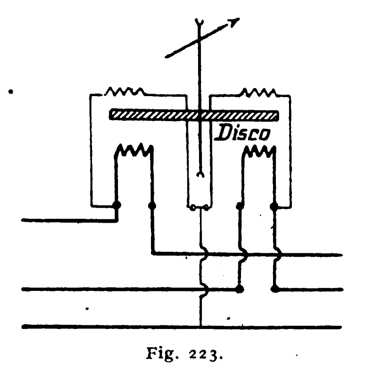


Fig. 223.

Wattímetro de fases equilibradas. — Para la medida

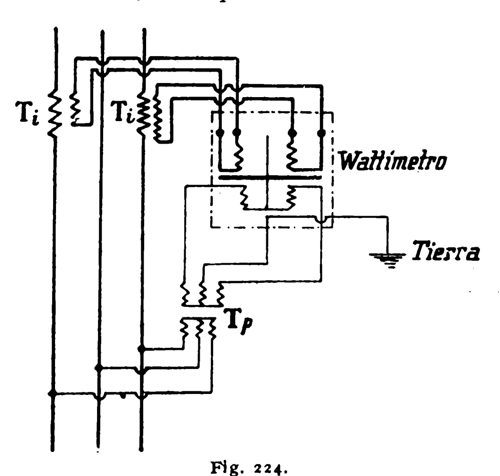


Fig. 224.

de las potencias absorbidas por receptores de fases equilibradas, se construyen wattímetros de campo giratorio cuyo montaje es el indicado por la figura 225.

Los dos devanados de hilo grueso de cada uno de los grupos están en serie en una línea 1; los devanados de

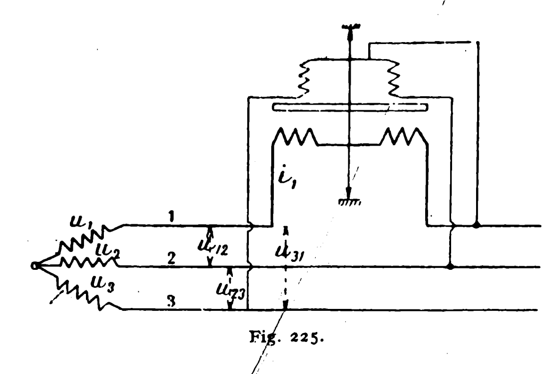


Fig. 225.

hilo fino estan, uno, entre las líneas 1 y 2, y el otro entre las líneas 1 y 3.

Según este montaje, la potencia indicada por el wattímetro tiene por valor instantáneo:

$$W = u_{12}i_1 + u_{13}i_1 = i_1[(u_1 - u_2) + (u_1 - u_3)],$$

o sea:

$$W = 2\,u_1 i_1 = i_1(-u_2 - u_3).$$

Ahora bien:

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0, \qquad \text{de donde} \qquad u_1 = -u_2 - u_3;$$

luego:

$$W = 2\,u_1 i_1 + u_1 i_1 = 3\,u_1 i_1.$$

Es decir, que el wattímetro da la potencia absorbida, en el caso de un receptor de fases equilibradas.

EJERCICIOS

Construir un carrete que tenga la forma dada por el esquema de la figura 226. Sobre la armazón hay devanado un hilo aislado cuyo diámetro se calcula según la intensi-

dad de la corriente que se puede producir, y cuyos extremos están fijados a dos bornes B, B'. Dentro del carrete se

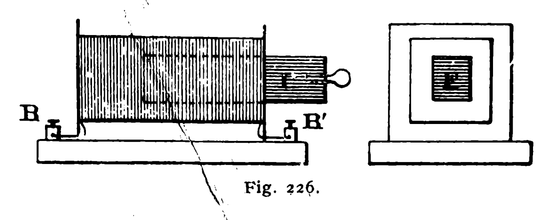


Fig. 226.

puede introducir más o menos un núcleo de hierro F, formado por placas barnizadas y unidas mediante pernos.

Si se quiere construir una armazón metálica, habrá que cortarla completamente según una de sus generatrices.

Efectuar el montaje representado en la figura 227.

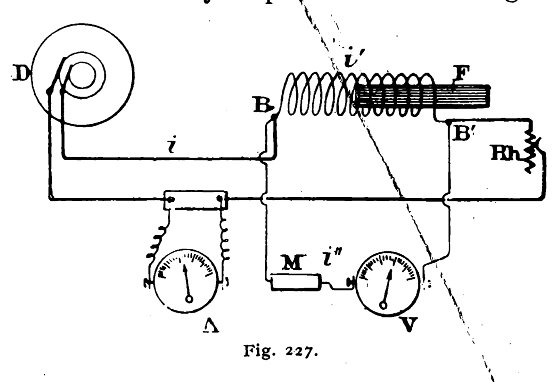


Fig. 227.

Medir la resistencia R del carrete, y si no está marcada en los aparatos, la resistencia r del voltímetro térmico y de su resistencia en serie M.

a) *Frecuencia.* — Medir con el taxímetro o con un cuenta-revoluciones, la velocidad del alternador D. Sea N vueltas por segundo; si $2p$ es el número de polos inductores, la frecuencia es:

$$N = p \times n.$$

b) *Pulsación:*

$$\omega = 2\pi N = 2 \times 3{,}14 \times N$$

c) *Impedancia.* — Colocar en una posición determinada el hierro F en el carrete (introduciéndolo en unas tres cuartas partes, por ejemplo). Leer la intensidad eficaz de la corriente dada por el amperímetro térmico A y la d. d. p. eficaz U entre los bornes BB' del carrete, dada por el. voltímetro V. Se tiene:

$$(1) \qquad I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2}};$$

siendo $\sqrt{R^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2}$, la impedancia del carrete, de donde

$$\text{impedancia} = \frac{U}{I}.$$

Al establecer la fórmula (1) se admite que la corriente I medida por el amperímetro es el valor eficaz de la corriente que circula por el carrete, lo cual no es rigurosamente exacto.

Se puede tener en cuenta la corriente derivada en el voltímetro del modo siguiente: sean i', i'' los valores instantáneos de la corriente en el carrete y en el voltímetro, e i la corriente total en el mismo momento, dada por el alternador, y que atraviesa, por consiguiente, el shunt del amperímetro. Entre estos valores instantáneos se tiene la relación: $i = i' + i''$.

Sea en dicho momento, u la d. d. p. entre los bornes del carrete. Tomemos como origen de las fases la de esta d. d. p.; como el voltímetro y su resistencia no tienen autoinducción, la corriente i'' estará en fase con U, y su vector representativo será tal como OA, siendo su valor:

$$I''_{ef} = \frac{U}{r};$$

i' está defasada en atraso respecto a u en un ángulo φ tal que:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\mathcal{L}\omega}{R}$$

y estará representada por el vector OB, siendo su magnitud:

$$I'_{ef} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2}}.$$

La diagonal QC del paralelogramo construído sobre OB y OA mide el valor I_{ef} de la corriente dada por el amperímetro (fig. 228). Se sabe que el triángulo OBC da la relación:

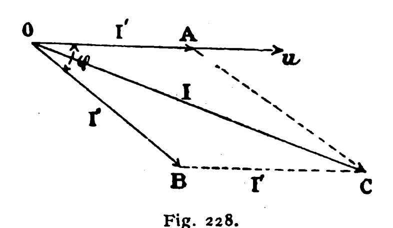


Fig. 228.

$$I^2 = I'^2 + I''^2 - 2\, I' I'' \cos OBC,$$

o sea:

$$I^2 = I'^2 + I''^2 + 2\, I' I'' \cos \varphi.$$

Pero:

$$I' = \frac{U}{r}, \qquad I'' = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2}}, \qquad \cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2}}$$

y sustituyendo en el valor de I^2 resulta:

$$I^2 = \frac{U^2}{r^2} + \frac{U^2}{R^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2} + 2 \frac{U^2}{r\sqrt{R^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2}} \times \frac{R}{\sqrt{R^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2}}$$

o sea:

$$I^2 = U^2 \left(\frac{1}{r^2} + \frac{2\,R + r}{r} \times \frac{1}{R^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2} \right),$$

de donde:

$$R^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2 = \frac{U^2 \left(\frac{2\,R + r}{r} \right)}{I^2 - \frac{U^2}{r^2}} = \frac{U^2 \left(1 + \frac{2\,R}{r} \right)}{I^2 - \frac{U^2}{r^2}}.$$

Se ve que si la resistencia del voltímetro fuera infinita, se obtendría el valor dado:

$$R^2 + \mathcal{L}'^2 \omega^2 = \frac{U^2}{I^2}.$$

Comparar estos dos valores y determinar el error cometido al no tener en cuenta la corriente derivada en el voltímetro.

d) *Reactancia.*—Conociendo la impedancia $\sqrt{R^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2}$ se deducirá fácilmente la reactancia $\mathcal{L}\omega$ y el coeficiente $\mathcal{L}$.

e) *Coeficiente de autoinducción.*—Comprobar que el valor de $\mathcal{L}$ varía cuando se cambia la intensidad de la corriente para una misma posición del núcleo (con lo cual varía μ).

Repetir las mismas medidas y cálculos, haciendo variar la posición del hierro en el carrete. Se verá que a medida que el hierro penetra en el carrete, la corriente I disminuye; la d. d. p. U aumenta; la reactancia, la impedancia y el coeficiente de autoinducción aumentan.

Hacer los mismos estudios anteriores con un segundo carrete construído como el primero, pero no idéntico, y repetir, sobre estos dos carretes montados en serie, las mismas medidas y cálculos. Comprobar que la reactancia del sistema de los carretes es igual a la suma de las reactancias correspondientes a cada carrete.

$$\mathcal{L}\omega + \mathcal{L}'\omega$$

y que la impedancia tiene por valor:

$$\sqrt{(R + R')^2 + (\mathcal{L} + \mathcal{L}')^2 \omega^2}.$$

Las medidas $\mathcal{L}$, $\mathcal{L}'$ y $\mathcal{L} + \mathcal{L}'$ deben hacerse para una misma intensidad.

Agrupar los dos carretes en paralelo y comprobar experimentalmente los resultados deducidos del cálculo. Sea s la reactancia de un carrete: $s = \mathcal{L}\omega$; la *conductancia* estará dada por la expresión:

$$\gamma = \frac{R}{R^2 + s^2}$$

y la *susceptancia* por la siguiente:

$$\sigma = \frac{s}{R^2 + s^2}$$

Calcular las conductancias ρ_1 y ρ_2 de los dos carretes, y sus susceptancias σ_1 y σ_2.

Calcular a continuación la conductancia ρ y la susceptancia σ del sistema de los dos carretes montados en paralelo; comprobar que:

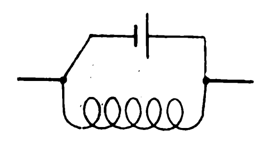


Fig. 229.

$$\rho = \rho_1 + \rho_2, \qquad \sigma = \sigma_1 + \sigma_2$$

y que:

$$I = u\sqrt{\rho^2 + \sigma^2}.$$

Efectuar las mismas operaciones con un carrete puesto en paralelo con un condensador de capacidad C conocida (fig. 229). La reactancia en este caso es:

$$s = \frac{1}{C\omega}.$$

Comprobar que en este caso se tiene también:

$$\rho = \rho_1 + \rho_2, \qquad \sigma = \sigma_1 + \sigma_2.$$

Potencia, factor de potencia, defasaje, componente wattada y dewattada de la corriente.—Medir la potencia W gastada en uno de los carretes empleados anteriormente, mediante un wattímetro. Medir la d. d. p. eficaz U entre los extremos del carrete y la corriente eficaz I. El defasaje φ de la corriente sobre la d. d. p. es tal que:

$$W = U \times I \times \cos\varphi.$$

Conociendo W, U e I se deduce de esta última fórmula el valor del factor de potencia $\cos\varphi$, y por lo tanto el defasaje φ.

La componente wattada de la corriente es $I\cos\varphi$, y la componente dewatada I sen φ.

Se hace el montaje indicado por la figura 230.

a) Medir, para una cierta posición del hierro: U, I y W; efectuar los cálculos indicados. Demostrar que a medida que el hierro entra en el carrete, la potencia disminuye al mismo tiempo que el factor de potencia cos φ. El defasaje φ aumenta.

La componente wattada disminuye y la componente dewattada de la corriente aumenta.

b) Poner en serie con el carrete otro, sin hierro, o mejor aun, una resistencia. Calcular de nuevo el defasaje,

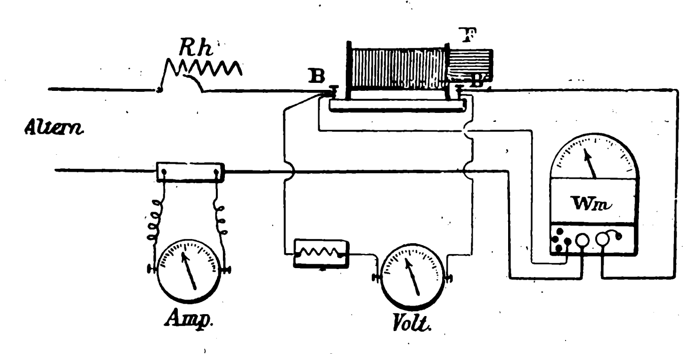


Fig. 230.

y demostrar que disminuye. Comprobar que el defasaje es tanto menor cuanto mayor es la resistencia en serie.

c) Poner en derivación con el carrete un condensador, y volver a calcular el defasaje y comprobar que es menor que si el carrete estuviera solo.

d) Repetir las mismas medidas sustituyendo el carrete por un cierto número de lámparas de incandescencia. Comprobar que el defasaje es nulo ($W = U \times I$).

e) Efectuar las mismas medidas de defasaje y potencia por el método de los tres voltímetros y después por el método de los tres amperímetros.

Corrientes trifásicas.—*a*) Montaje en estrella.—Construir tres resistencias iguales y montarlas en estrella; después alimentarlas con un generador trifásico (fig. 231). Medir con el voltímetro las d. d. p. eficaces entre 1-2, 2-3 y 3-1: estas d. d. p. son iguales, y sea U' su valor común; medir

después estas diferencias de potencial U entre 1, 2, 3 y O, y comprobar que:

$$U' = U\sqrt{3}.$$

Medir la potencia absorbida: 1.º, colocando el hilo grueso de un voltímetro en uno de los conductores 1, 2 ó 3, y el hilo fino entre el conductor y el centro O; triplicar la indicación; 2.º, colocar el hilo grueso en 1, y el hilo fino entre 1 y 3, después el hilo grueso en 2, y el hilo fino entre 2 y 3. Sumar las dos indicaciones y comprobar que se obtiene el mismo resultado que anteriormente.

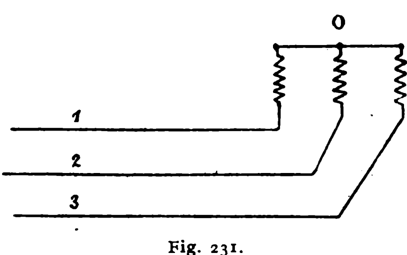


Fig. 231.

b) Desequilibrar las tres fases, tomando tres resistencias diferentes; repetir las mismas medidas y comprobar que los resultados obtenidos por los dos procedimientos no son iguales.

c) Montaje en triángulo. —Tomar las tres resistencias iguales, montarlas en triángulo (fig. 232). Probar que siendo I la corriente en cada hilo de línea, e I' la corriente en cada resistencia, se tiene:

$$I = \sqrt{3}\, I'.$$

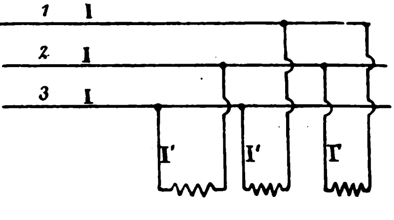


Fig. 232.

Medir con dos wattímetros o con uno sólo sucesivamente colocado como en el caso anterior (montaje en estrella) la potencia absorbida. Comprobar que si las tres resistencias son las mismas que en este caso, y si la tensión entre las anillas del alternador es también la misma, la potencia es la misma en los dos montajes.

d) Desequilibrar las tres fases tomando las mismas tres resistencias que en el ejercicio *b*) y comprobar que en este caso también es la misma la potencia.

e) Hacer medidas y montajes idénticos con tres carretes de autoinducción variable montados sucesivamente en estrella y en triángulo.

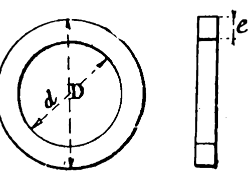


Fig. 233.

Medida de la potencia perdida en una muestra de palastro, mediante un wattímetro. — Se cortan varias muestras de los palastros estudiados y se unen en forma de un toro *T* (figs. 233 y 234) del cual se miden las dimensiones: sea *D* el diámetro exterior en centímetros, *d* el diámetro interior, *e* el espesor y $V = \pi \frac{(D^2 - d^2)}{4} e$ cm³ el volumen.

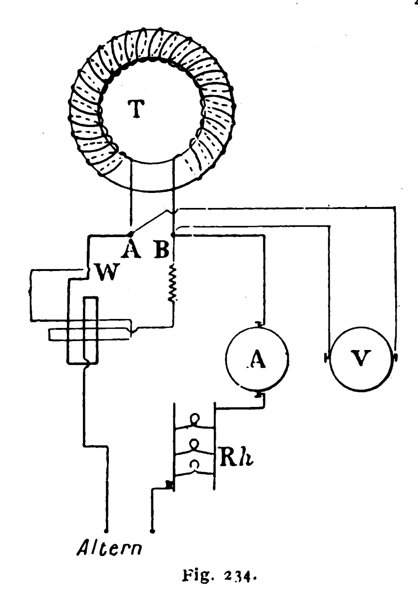


Fig. 234.

Sobre este toro se arrollan espiras en número conocido *n*, siendo su superficie

$$S = \frac{D - d}{2} e \text{ cm}^2.$$

Estas espiras son recorridas por una corriente alterna de frecuencia conocida *N*, cuyo valor medio se puede regular mediante un reostato *Rh*. Se mide con el wattímetro la potencia absorbida, *W* watts, al mismo tiempo que la corriente eficaz *I* en estas espiras y la diferencia de potencial eficaz *U* entre sus extremos *A* y *B* (fig. 234). La potencia medida con el wattímetro representa la suma de las pérdidas por efecto

Joule, por histeresis y por corrientes de Foucault. Las pérdidas por efecto Joule pueden determinarse fácilmente, ya que se puede medir la resistencia r de las espiras y la corriente I que las recorre es conocida; estas pérdidas tienen por valor rI^2.

Se sabe que las pérdidas por histeresis son proporcionales a la potencia de exponente 1,6 de la inducción, y las pérdidas por corrientes de Foucault al cuadrado de la inducción máxima a que llega el hierro. Por consiguiente, si $\mathcal{B}$ es esta inducción, la suma de estas pérdidas tiene por valor $a\,\mathcal{B}^{1,6} + b^2\,\mathcal{B}$, luego puede decirse que:

$$W = r\,I^2 + a\,\mathcal{B}^{1,6} + b\,\mathcal{B}^2.$$

El conocimiento de las pérdidas por histeresis y por corrientes de Foucault se reduce a la determinación de los factores a y b.

Se hacen dos medidas con dos corrientes distintas I_1 e I_2, con lo cual se tendrán dos potencias diferentes medidas con el wattímetro, W_1 y W_2, y dos diferencias de potencial U_1 y U_2 entre A y B, resultando:

$$(1) \qquad W_1 - r\,I_1^2 = a\,\mathcal{B}_1^{1,6} + b\,\mathcal{B}_1^2$$

$$(2) \qquad W_2 - r\,I_2^2 = a\,\mathcal{B}_2^{1,6} + b\,\mathcal{B}_2^2,$$

siendo $\mathcal{B}_1$ y $\mathcal{B}_2$ las inducciones del toro por las corrientes I_1 e I_2.

Ahora bien, se pueden calcular $\mathcal{B}_1$, $\mathcal{B}_2$ en función de U_1 y U_2, pues se demuestra que:

$$\mathcal{B} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \times \frac{U}{SnN} \times 10^8 \text{ gauss.}$$

Por consiguiente, se tendrá:

$$\mathcal{B}_1 = \frac{1}{4,44}\,\frac{U_1}{SnN}\,10^8, \qquad \text{y} \qquad \mathcal{B}_2 = \frac{1}{4,44}\,\frac{U_2}{SnN}\,10^8.$$

Una vez determinadas de este modo las inducciones $\mathcal{B}_1$ y $\mathcal{B}_2$ se ve que las ecuaciones (1) y (2) únicamente contienen dos incógnitas *a* y *b* fáciles de determinar.

Conociendo *a* se puede deducir el coeficiente de Steinmetz, pues se tiene:

$$a\,\mathcal{B}^{1,6} = V\,N\,\eta\,\mathcal{B}^{1,6},$$

de donde:

$$\eta = \frac{a}{V\,N}.$$

Formar un toro con un paquete de láminas de inducido y operar como acabamos de decir.

CAPÍTULO XII

Contadores, fasímetros y frecuencímetros para corrientes alternas

I. Contadores-motores

Los contadores-motores Thomson, Vulcain, etc., que hemos estudiado no contienen hierro en el inducido, por lo cual pueden servir para las corrientes alternas. Pero llevan consigo un error debido a la reactancia de su circuito de hilo fino, del inducido y de su resistencia en serie. Se demuestra que se atenúa considerablemente esta causa de error por medio del dispositivo de Frager, que consiste en arrollar alrededor del circuito de hilo grueso del contador una espira cerrada en cortocircuito sobre sí misma.

La instalación y la graduación de estos contadores utilizados para las corrientes alternas simples, se hacen como hemos dicho para las corrientes continuas.

Para las corrientes bifásicas y trifásicas se pueden emplear dos contadores convenientemente dispuestos: por ejemplo, para las corrientes trifásicas se montan los dos contadores como los dos wattímetros para la medida de las potencias (pág. 254), del modo indicado en la figura 235.

Se forma un contador con dos contadores monofásicos cuyos inducidos están montados sobre un mismo

árbol (fig. 236). Las dificultades de este método estriban en el coste excesivo que supone y en la necesidad

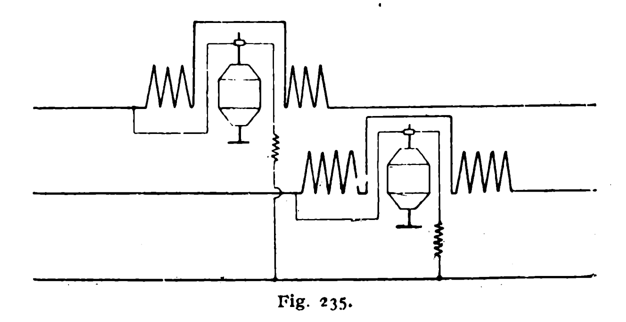


Fig. 235.

de hacer dos lecturas en el primer montaje, o de obtener en el segundo dos aparatos que tengan la misma

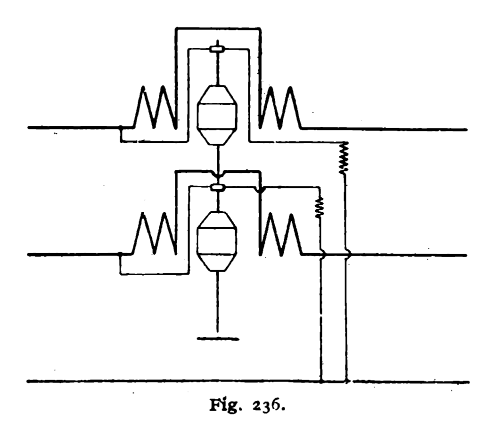


Fig. 236.

constante, por lo cual se ha abandonado este sistema de contadores.

II. Contadores pendulares

El contador Aron, que ya hemos descrito anteriormente (pág. 198), puede utilizarse para las corrientes

monofásicas; también hay contadores Aron para corrientes trifásicas, tal como lo representa esquemáticamente la figura 237.

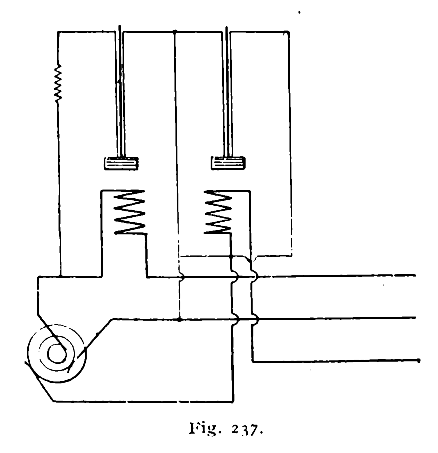


Fig. 237.

III. Contadores de campo giratorio

La teoría de estos contadores es muy complicada, por lo cual renunciamos a exponerla en este tratado práctico. Estos aparatos se componen en general, de dos carretes, uno de hilo grueso *A*, recorrido por la corriente de línea, y el otro *B* de hilo fino en derivación sobre el circuito de utilización. Estos dos carretes tienen sus ejes paralelos y crean campos alternos dirigidos normalmente a un disco de cobre o de aluminio *D*. Este disco gira entre las ramas de un imán permanente que crea un par resistente, gracias al cual se puede efectuar la regulación del contador (fig. 238). El eje de este disco arrastra en su movimiento unas agujas que dan la energía consumida en el circuito de utilización.

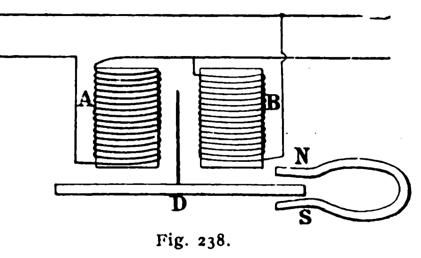


Fig. 238.

Cada uno de los campos alternos, creados por los carretes, produce corrientes inducidas en el disco, sobre las cuales actúa el otro campo, resultando una

acción *cruzada* que determina la rotación del disco.

En algunos tipos de contadores, los dos campos están superpuestos, estando los dos carretes devanados sobre un mismo núcleo magnético laminar.

Se demuestra que es necesario realizar las siguientes condiciones:

1.ª La corriente i' en el carrete de hilo fino debe estar defasada en $\frac{\pi}{2}$ sobre la tensión en los bornes.

2.ª El par amortiguador debido a la acción del imán sobre el disco debe ser potente.

3.ª Los rozamientos en el arranque, deben estar compensados por un par suplementario conveniente, obtenido creando una disimetría en las piezas polares cuyos campos obran sobre el disco.

Hay muchos contadores de esta clase, que difieren sobre todo por los procedimientos empleados para obtener el defasaje $\frac{\pi}{2}$ entre las corrientes en el carrete de hilo fino y la tensión. Describiremos solamente algunos de estos aparatos, y de un modo muy superficial.

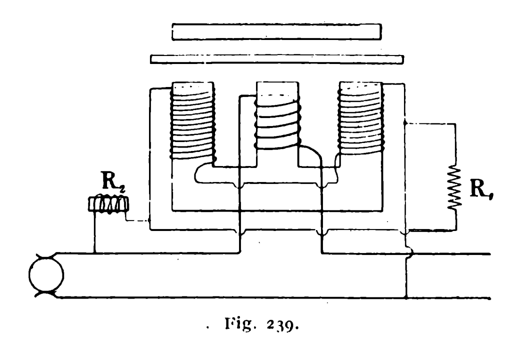


Fig. 239.

Contador A. E. G. (Hummel). — Un carrete en serie y dos en derivación están montados sobre tres núcleos laminares, que tienen la misma culata; un

disco de aluminio puede girar delante de los núcleos, cuyos ejes son paralelos. El circuito magnético se cierra sobre una armadura colocada al otro lado del disco (fig. 239).

El defasaje de la corriente derivada sobre la tensión se obtiene del modo siguiente: en derivación con el devanado de hilo fino hay una resistencia no inductiva regulable R_1 y en serie con este sistema hay una resistencia inductiva R_2, cuyo coeficiente de autoinducción se puede variar; con una regulación conveniente de estas variables, se puede obtener el defasaje de $\frac{\pi}{2}$ de la corriente derivada sobre la tensión (fig. 240).

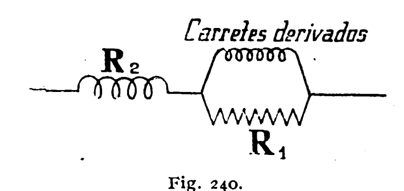


Fig. 240.

Contador A. C. T. —Dos carretes de hilo fino *A*, *A'* y uno de hilo grueso *B* están devanados sobre una misma armadura de hierro dulce, produciendo el campo giratorio que arrastra al disco *D*. Otro carrete *B'* de hilo grueso colocado debajo del disco sirve para dar lugar a un defasaje entre el flujo de tensión y la tensión en los bornes (figs. 241 y 242).

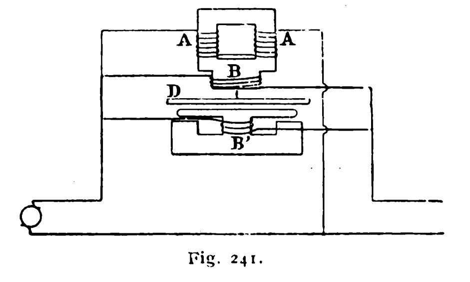


Fig. 241.

Contador Batault. —Sobre un electroimán de hierro laminar hay dos carretes de hilo fino y en los extre-

mos polares de este electroimán hay un carrete en serie. Al otro lado del disco *D* se encuentra una placa de hierro *F*, a

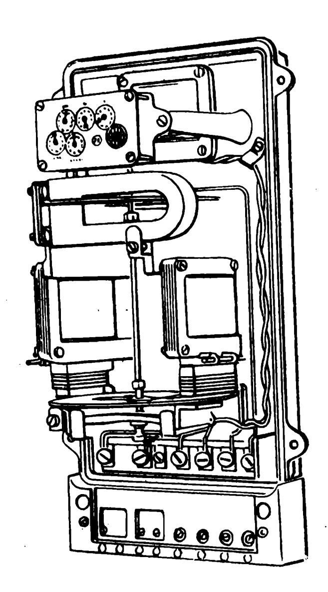


Fig. 242. — Contador A. C. T. para corriente alterna.

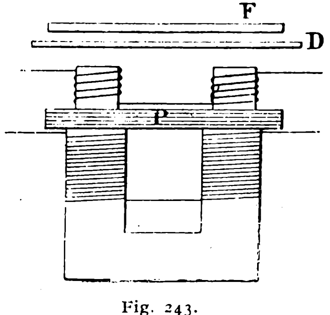


Fig. 243.

través de la cual se cierran las líneas de fuerza, para obtener un defasaje próximo a $\frac{\pi}{2}$ con un número de espiras bastante reducido, hay dispuesto sobre los carretes de tensión un puente *P* de hierro laminar (figs. 243, 244 y 245).

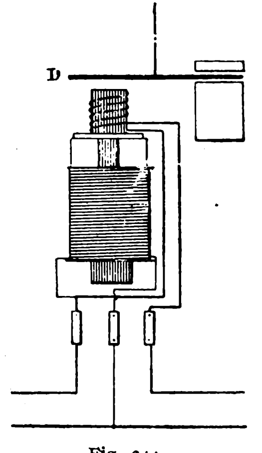
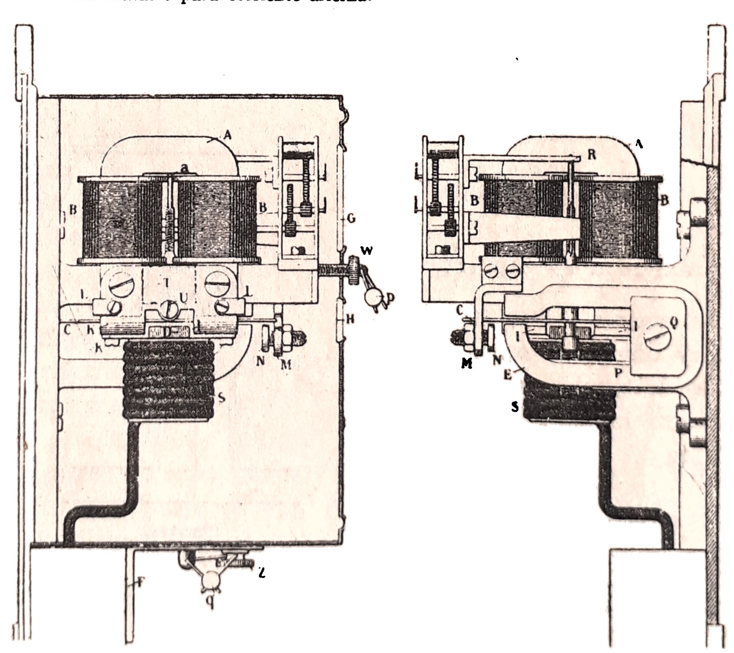


Fig. 244.

Contador Cosinus. — Por encima del disco de cobre están los dos carretes de tensión, devanados sobre las ramas de un electroimán con hierro laminar;

Fig. 245.
Contador Batault para corriente alterna.

Fig. 246.



por debajo del disco está el carrete serie (figs. 246 y 247).

Contadores polifásicos de campo giratorio.—I. *Corrientes trifásicas.*—*a*) LAS TRES FASES ESTÁN EQUILIBRADAS. — Consideremos, por ejemplo, el caso de un circuito en estrella $OABC$ (figura 248); sea I la corriente eficaz en cada línea, y U la tensión eficaz entre las líneas. Se ha visto (tomo I, GENERALIDADES, págs. 398 y 437) que la potencia, absorbida por este circuito, tiene por valor:

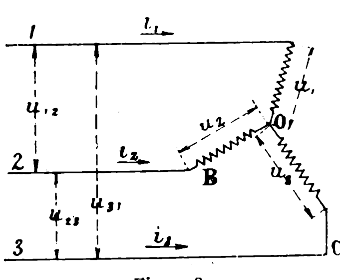


Fig. 248.

$$\sqrt{3}\, U I \cos \varphi,$$

siendo φ el defasaje de la corriente en cada fase sobre la tensión en estrella. Según lo dicho al tratar de los contadores monofásicos, la energía absorbida por la instalación será registrada por un contador cuyo carrete de hilo grueso sea recorrido por la corriente I, intercalada, por ejemplo, en la línea 1, y cuyo carrete de hilo fino, sometido a la tensión U, sea recorrido por una corriente defasada en $\frac{\pi}{2}$ sobre u_1. Para realizar esta última condición bastará unir el carrete de hilo fino, arrollado sobre un núcleo de hierro laminar, entre las líneas 1 y 3, y regular su coeficiente de autoinducción por medio de una resistencia óhmica en serie con el mismo, de modo que el defasaje de la corriente que lo atraviesa sea de 60° sobre u_{31} (figuras 249 y 250).

En efecto, representemos con tres vectores OA,

OB, OC las tensiones en estrella u_1, u_2, u_3; se sabe que $u_{31} = u_3 - u_1$, y por consiguiente, u_3 estará representada por el vector OD. La corriente i que recorre el carrete de hilo fino, que debe estar defasada $\frac{\pi}{2}$ sobre u_1, estará representada por el vector OE, y se ve que este vector forma un ángulo de 60° con OD, es decir, que i está defasado sobre u_{31} en un ángulo de 60° (fig. 251).

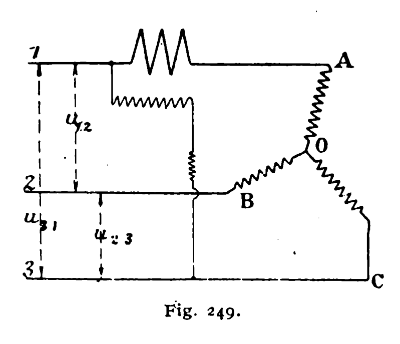
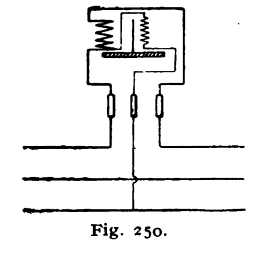


Fig. 249.

Es evidente que el montaje será el mismo si los circuitos de utilización están acoplados en triángulo.


Fig. 250.

De aquí resulta que es necesario unir el hilo fino con la línea 3 y no con la 2. Se comprueba que esta condición está cumplida teniendo presente que sobre un circuito no inductivo el par es mayor cuando el hilo fino está sobre el puente 1-3 que cuando está sobre el puente 1 - 2. Una vez colocado el contador, se enciende un cierto número de lámparas y se deriva el hilo fino, uno de cuyos extremos está en la línea 1, sucesivamente entre las otras dos líneas, estableciendo definitivamente la posición para la cual la velocidad del disco es la mayor.

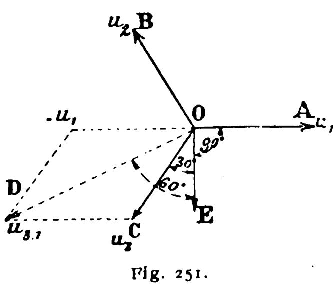


Fig. 251.

b) LAS TRES FASES ESTÁN DESIGUALMENTE CARGADAS. — Se ha visto (pág. 254) en el método de medida de las potencias trifásicas con dos wattímetros, que esta potencia tiene por valor:

$$W = u_{31}i_3 - u_{12}i_2.$$

Sea ahora un circuito en estrella $OABC$; según la fórmula anterior, la energía absorbida por el circuito es registrada por dos contadores: uno cuyo carrete serie es recorrido por la corriente i_3 y cuyo carrete shunt está derivado entre las líneas 1 y 3, recorrido por una corriente defasada $\frac{\pi}{2}$ sobre la tensión u_{31}; el otro contador tiene el carrete serie sobre la línea 2 y es recorrido por la corriente i_2, y el carrete de hilo fino está derivado entre las líneas 1 y 2, recorrido por una corriente defasada sobre la tensión u_{12} en un ángulo $\frac{\pi}{2}$.

En vez de dos contadores, únicamente se utiliza uno provisto de dos discos de aluminio montados sobre un mismo eje, que lleva las agujas indicadoras. Sobre cada uno de estos discos obran dos carretes intercalados en los hilos de línea, como acabamos de decir. Este dispositivo está representado en los esquemas de las figuras 252 y 253.

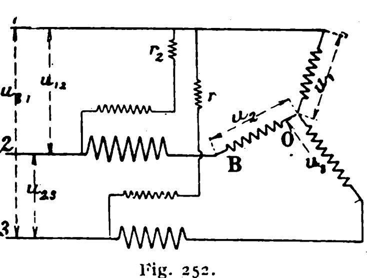


Fig. 252.

También se puede utilizar un solo disco sobre el cual obren los dos grupos de dos carretes.

Si las tres fases están dispuestas en triángulo, el contador se monta del mismo modo.

c) CIRCUITOS TRIFÁSICOS DE CUATRO HILOS. — La potencia media absorbida por los circuitos *OABC* tiene por valor (fig. 252).

$$W = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3.$$

Ahora bien, se sabe que:

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0,$$

de donde:

$$u_2 = - u_1 - u_3,$$

o sea:

$$W = u_1 i_1 - u_1 i_2 - u_3 i_2 + u_3 i_3$$

o también:

$$W = u_1 (i_1 - i_2) + u_3 (i_3 - i_2).$$

Se tiene un contador capaz de registrar esta energía haciendo actuar sobre un primer disco de aluminio: 1.°, un carrete serie diferencial, que dé los flujos proporcionales a i_1, $-i_2$; 2.°, un carrete derivado alimentado por la tensión u_1, y tal que la corriente que lo recorra esté defasada $\frac{\pi}{2}$ sobre esta tensión.

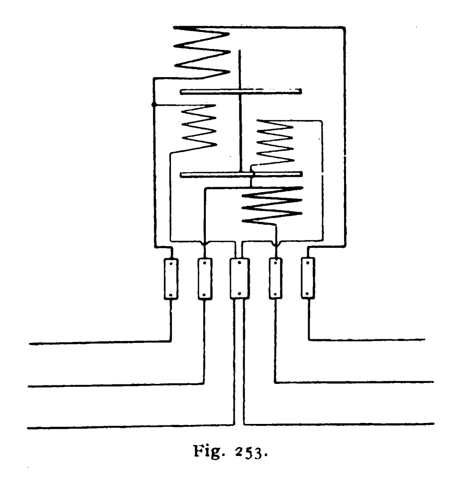


Fig. 253.

Sobre un segundo disco, solidario del primero, obran: 1.°, un carrete serie diferencial que da los flujos proporcionales a $i_2 - i_3$; 2.°, un carrete derivado alimentado por la tensión u_3 y tal que la corriente que lo recorre esté defasada $\frac{\pi}{2}$ sobre esta

tensión. Este contador está representado esquemáticamente en las figuras 254 y 255.

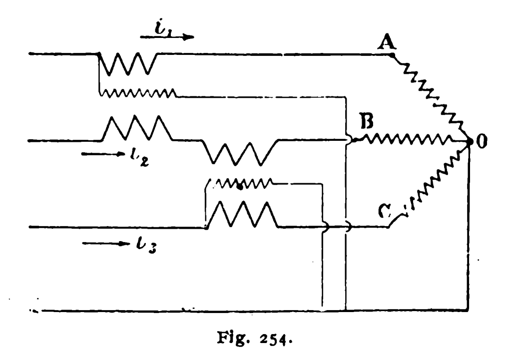


Fig. 254.

II. *Corrientes bifásicas.* —Se comprende fácil-

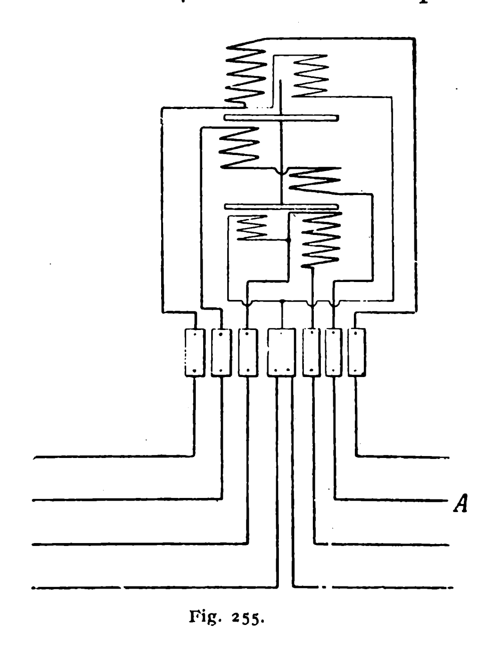


Fig. 255.

mente, después de lo expuesto, que un contador para

corrientes bifásicas se construirá del modo indicado en la figura 256.

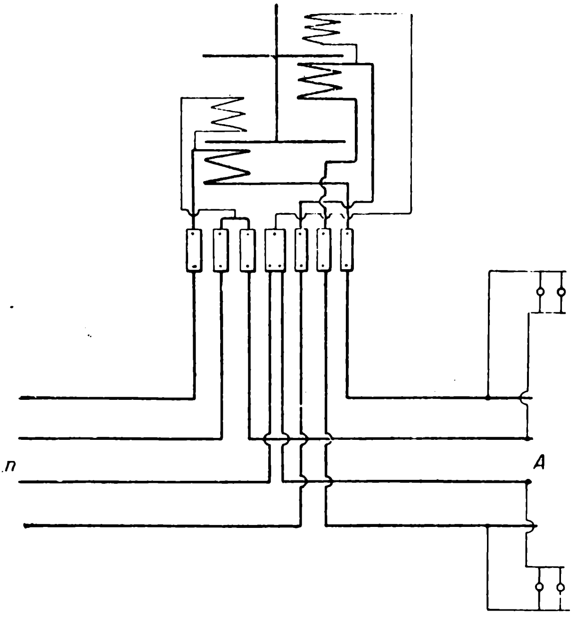


Fig. 256.

Contadores con transformadores. — Cuando la corriente tomada por la instalación tiene un valor demasiado elevado, y cuando la tensión eficaz pasa de un cierto valor, se emplean transformadores de tensión e intensidad.

La figura 257 representa un contador para corrientes alternas simples con un transformador de intensidad y otro de tensión; en la figura 258 se ve un contador trifásico con dos transformadores de intensidad.

Graduación y regulación de un contador de campo giratorio. — Se hacen las mismas operaciones que para

los contadores de corriente continua (Cap. IX). Cuando se toma como carga un circuito sin autoinducción, por ejemplo, lámparas de incandescencia, se puede emplear para medir la potencia utilizada un amperímetro y un voltímetro. Si el circuito es inductivo, compuesto de mo-

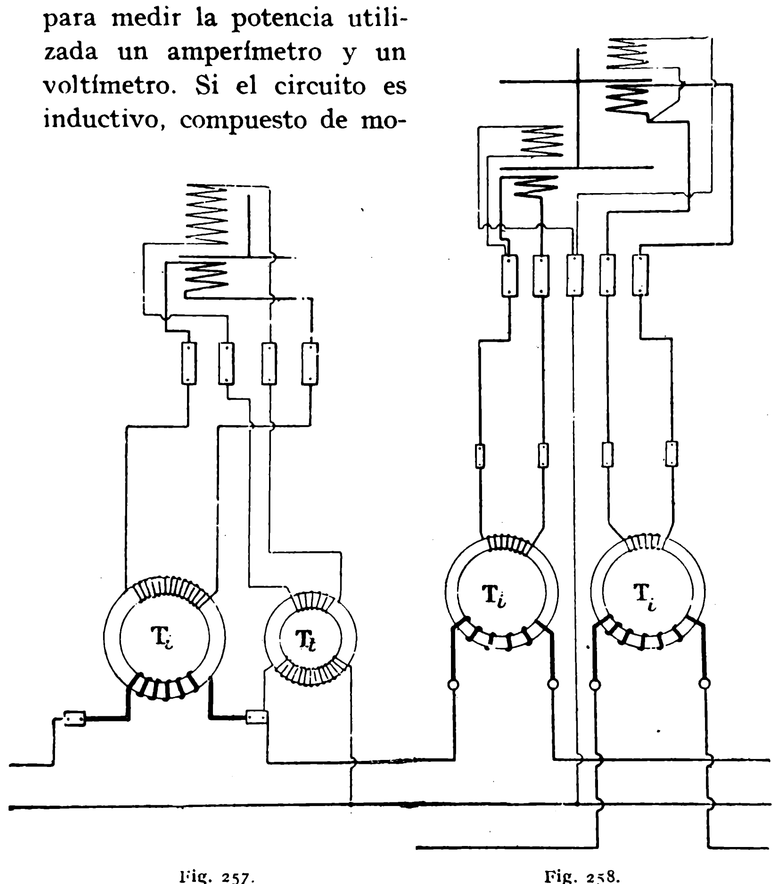


Fig. 257. Fig. 258.

tores, por ejemplo, se debe emplear un wattímetro. El montaje para la graduación está representado por la figura 259. Para la regulación, es preciso disminuir o aumentar al par resistente, según que el contador

atrase o adelante; para ello se obra sobre la acción del imán amortiguador mediante un shuntaje magnético: acercando una lengüeta de hierro al imán, se deriva un gran número de líneas de fuerza por el hierro, con lo cual se disminuye el par resistente; si se aleja, se aumenta el par resistente (fig. 260). En algunos motores, la regulación se hace corriendo el imán amortiguador respecto al disco; en otros tipos se deriva más o menos el flujo del carrete; estos dos procedimientos casi siempre van combinados.

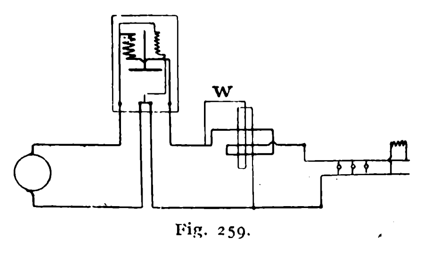


Fig. 259.

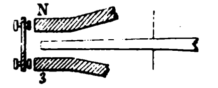


Fig. 260.

Contador trifásico. — 1.º PRUEBA CON CORRIENTE MONOFÁSICA.—Se comprueba la energía indicada sucesivamente por el aparato, alimentando únicamente un grupo de carretes cada vez, según el esquema de la figura 261.

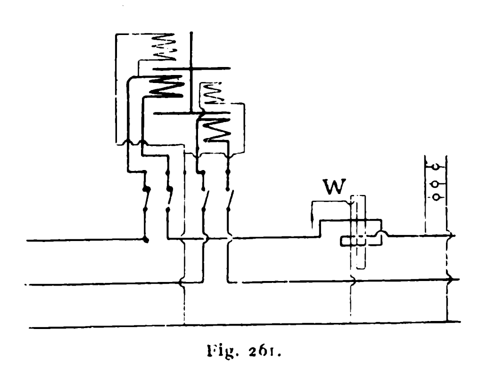


Fig. 261.

2.º PRUEBA CON CORRIENTE TRIFÁSICA. — Se mide la potencia por el método de los dos wattímetros, procediendo como indicamos para la corriente continua.

Es evidente que para la medida de la potencia

se podrá emplear un solo wattímetro y un conmutador (página 257). El montaje es el indicado en la figura 262.

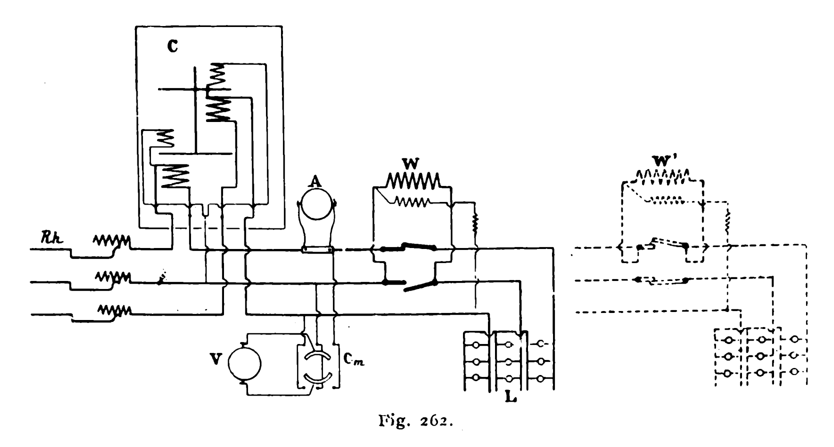


Fig. 262.

IV. Observación sobre el montaje de contadores en el caso de emplear el método de los dos wattímetros

Hay en este tipo de contadores cuatro bornes para los carretes «intensidad» y tres para los carretes «tensión». Los errores pueden provenir de la mala conexión de los diferentes carretes con los bornes, y, por consiguiente, con los hilos de la línea. Hay, pues, que asegurarse mediante una prueba de que dichas conexiones están bien hechas.

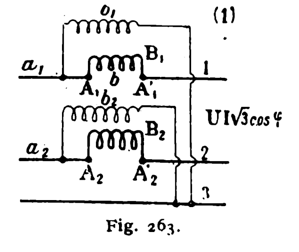


Fig. 263.

1.° Supongamos que las conexiones normales sean las indicadas por la figura 263. El grupo wattímetro $B_1 b_1$ es tal, que la corriente en el carrete de hilo grueso B_1 colocado en la línea 1, y en el carrete de hilo fino derivado entre las líneas 1 y 3, están defasadas una sobre otra en un

ángulo 30° + φ (fig. 264). El grupo wattímetro $B_2 b_2$ está conectado de tal manera que las corrientes en B_2 y b_2 están defasadas una sobre otra en un ángulo 30° — φ, como se ve en la misma figura.

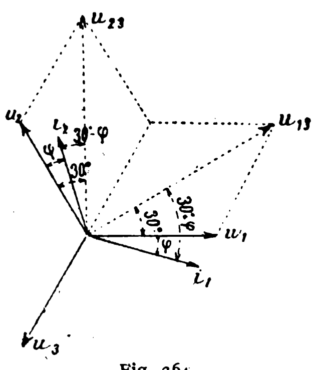


Fig. 264.

La potencia que indicará el sistema de estos dos grupos será:

$$W = UI \cos(30 + \varphi) + \\ + UI \cos(30 - \varphi),$$

donde U es la tensión compuesta (entre líneas), e I la corriente en cada línea.

Poniendo UI como factor común, se puede escribir la anterior fórmula en la siguiente forma:

$$W = UI [\cos(30 + \varphi) + \cos(30 - \varphi)],$$

o sea:

$$W = 2\ UI \cos \frac{30 + \varphi + 30 - \varphi}{2} \times \\ \times \cos \frac{30 + \varphi - 30 + \varphi}{2} = 2\ UI \cos 30 \cos \varphi;$$

y como cos 30° es igual a $\frac{\sqrt{3}}{2}$ resulta:

$$W = 2\ UI \times \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi = UI \sqrt{3} \cos \varphi,$$

donde se ve que el contador registrará la suma $\Sigma UI \sqrt{3} \cos \varphi \times t$, es decir, la energía consumida.

2.° Supongamos que uno de los carretes de hilo fino se invierta, por ejemplo, el carrete b_2, como se ve

en la figura 265; en este caso, la potencia indicada sería:

$$W = UI \cos(30 + \varphi) - UI \cos(30 - \varphi) =$$
$$= UI [\cos(30 + \varphi) - \cos(30 - \varphi)],$$

$$W = 2\ UI \operatorname{sen} \frac{30 + \varphi + 30 - \varphi}{2} \times$$
$$\times \operatorname{sen} \frac{30 + \varphi - 30 + \varphi}{2} = 2\ UI \operatorname{sen} 30 \operatorname{sen} \varphi;$$

y como $\operatorname{sen} 30^{\circ} = \frac{1}{2}$, resulta:

$$W = UI \operatorname{sen} \varphi.$$

3.° El carrete b_1 podría conectarse entre 2 y 3, y b_2 entre 1 y 3, y en el mismo sentido que el primer

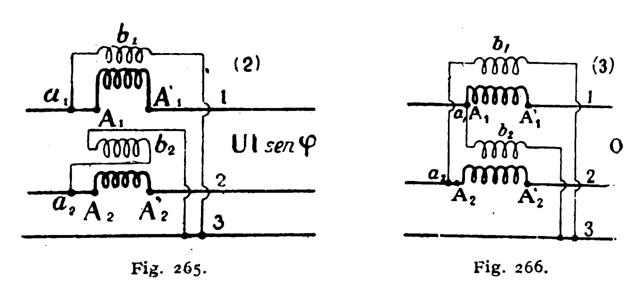


Fig. 265.

Fig. 266.

caso (fig. 266). El diagrama de la figura 267 demuestra que el defasaje de la corriente en la línea 1 sobre la tensión entre 2 y 3 es $120^{\circ} - 30^{\circ} + \varphi$, o sea $90^{\circ} + \varphi$, y que el defasaje entre la corriente en la línea 2 y la tensión entre las líneas 1 y 3 es:

$$30^{\circ} + 30^{\circ} + 30^{\circ} - \varphi = 90^{\circ} - \varphi.$$

La potencia que daría el sistema de los dos grupos wattímetros sería:

$$UI \cos(90 + \varphi) + UI \cos(90 - \varphi)$$

o sea:

$$2\ UI \cos \frac{90 + \varphi + 90 - \varphi}{2} \times$$

$$\times \cos \frac{90 + \varphi - 90 + \varphi}{2} = 2\ UI \cos 90 \cos \varphi = 0.$$

Se ve de este modo que el contador no giraría.

4.º Si uno de los carretes de hilo fino está

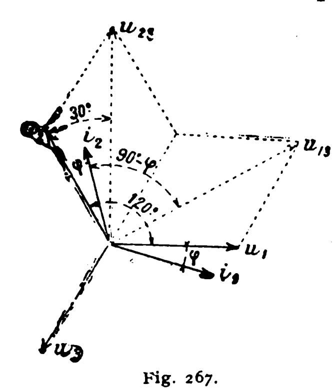


Fig. 267.

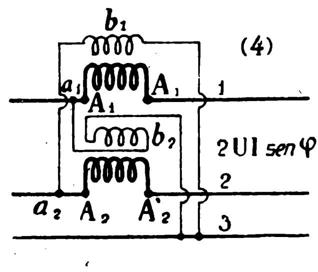


Fig. 268.

conectado en sentido inverso del anterior (fig. 268) la potencia que indicarían los grupos wattímetros sería:

$$W = UI \cos (90 + \varphi) - UI \cos (90 - \varphi),$$

o sea:

$$2\ UI \operatorname{sen} \frac{90 + \varphi + 90 - \varphi}{2} \times$$

$$\times \operatorname{sen} \frac{90 + \varphi - 90 + \varphi}{2} = 2\ UI \operatorname{sen} 90 \operatorname{sen} \varphi = 2\ UI \operatorname{sen} \varphi.$$

El contador giraría con una velocidad doble de la que tendría en el montaje 2.º

Los montajes se harán, por consiguiente, de este modo: se ve primero si el punto común de los carretes está sobre la línea en la cual no hay carrete de intensidad; en el caso de que la instalación tenga transformadores de intensidad, este punto común se toma

sobre la línea que no tiene transformador. Se cierran después los interruptores de modo que se alimente un circuito. Si el contador gira, es señal de que el montaje es uno de los indicados en los casos anteriores 1, 2 ó 4. Se cruzan las conexiones del carrete de hilo fino, que es lo que se hace en el montaje 3, y si el contador deja de girar es señal de que el primer montaje estaba bien hecho.

Al contrario, si el contador gira con más rapidez (aproximadamente con velocidad doble) es que se trata del caso 2, y que el cruzamiento ha sido hecho según el montaje 4; bastará invertir las conexiones de uno de los carretes de hilo fino. Si en vez de tomar una velocidad mayor, el contador pierde velocidad (velocidad reducida a la mitad) es que el montaje era el del caso 4, y que por cruzamiento se ha hecho el montaje 2. Se hace en este último montaje la inversión de los extremos de un carrete de hilo fino.

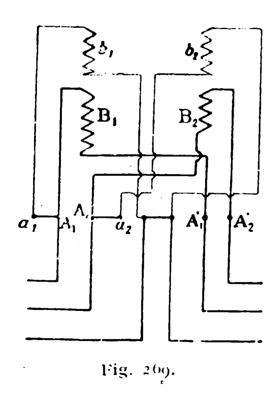


Fig. 269.

Cuando de este modo se ha hecho el montaje correcto 1, hay que cerciorarse de ello invirtiendo los extremos a_1 y a_2 de los hilos finos; el contador no debe girar. Por último, se establecen las conexiones definitivas.

V. Contadores especiales

Contadores de «sobrepaso». — La parte móvil solamente se mueve cuando la potencia utilizada por el abonado pasa de un valor determinado, fijado de antemano, y entonces sólo registra la diferencia entre la

energía consumida y la energía correspondiente fijada con anterioridad.

Las condiciones de funcionamiento se realizan principalmente de dos modos: 1.°, moviendo las agujas indicadoras con el satélite de un tren diferencial; 2.°, por la adición de un par antagonista constante, proporcional a la potencia fijada.

Aparatos de tren diferencial. — El satélite *S* que mueve las agujas tiende a ser arrastrado por dos ruedas dentadas *D*, *D'*, accionadas la primera por la parte móvil del contador, con una velocidad proporcional a la potencia utilizada; la otra *D'* es movida por un sistema motor, con una velocidad constante, determinada por el valor de la potencia, fijada por el contrato (fig. 270).

Cuando la potencia utilizada es inferior a la pre-

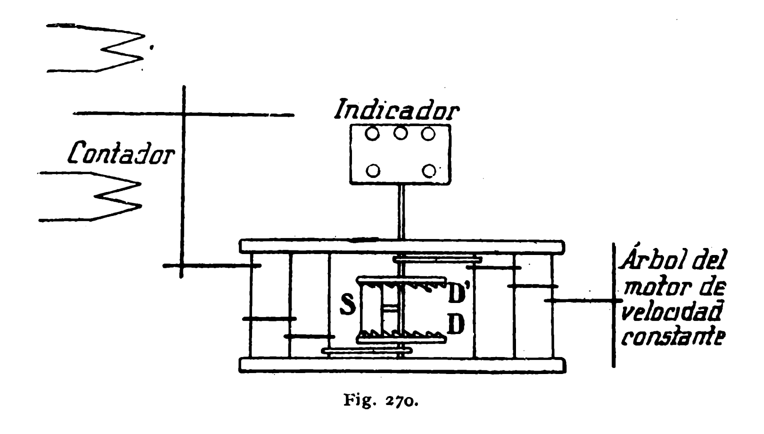


Fig. 270.

vista en el contrato, *D* gira con una velocidad menor que la de *D'*, y *S* pone en acción un piñón en un sentido tal que pasa por los dientes de una rueda montada en el árbol de la primera, sin arrastrarla; en cuanto la potencia utilizada pasa del valor prefijado, *D* gira más

rápidamente que D', el satélite gira en sentido inverso, y el piñón obra sobre los dientes de la rueda moviendo el sistema de las agujas.

A este tipo pertenece el contador Cosinus, y el contador Siemens-Schuckert.

Contadores de par antagonista. — El par antagonista puede ser debido al efecto de una pieza metálica fijada sobre el árbol, en el campo de un imán permanente, o a un carrete adicional recorrido por una corriente, que produce en el disco del contador un par de sentido opuesto a su movimiento.

En el contador construído por la «Compagnie pour la fabrication des compteurs» el árbol lleva una pieza cilindrocónica de níquel que gira entre los polos de un imán permanente. Cuando, bajo la influencia de una potencia superior a la fijada, la parte móvil del contador se mueve, se produce un par antagonista, proporcional a la energía absorbida por histeresis, a cada ciclo, en el cilindro de níquel. Ahora bien, el valor de esta energía no depende de la velocidad, sino solamente de la intensidad del campo creado por el imán y del volumen de la parte del cilindro sometido a su acción; es decir, que hay un par constante aplicado a la parte móvil del contador, tendiendo a oponerse a su movimiento. Basta regular la posición del cilindro de níquel respecto a los polos del imán, de modo que el contador no arranque más que a partir de la potencia fijada en el contrato, para que la energía marcada sea únicamente la consumida por encima de esta potencia.

Con una llave se puede mover el imán en sentido vertical; algunos modelos están provistos de una esfera graduada en watts sobre la cual se mueve una aguja al mismo tiempo que el imán, la cual indica la potencia *de exceso* correspondiente a la posición del imán.

En el contador *B. T.* hay un carrete antagonista de

hilo fino (figs. 271 y 272) arrollado sobre el carrete de hilo grueso, en derivación sobre la tensión con una resistencia no inductiva en serie; el sentido del arrollamiento es tal, que produce un flujo de sentido inverso al creado por el carrete de hilo grueso, de

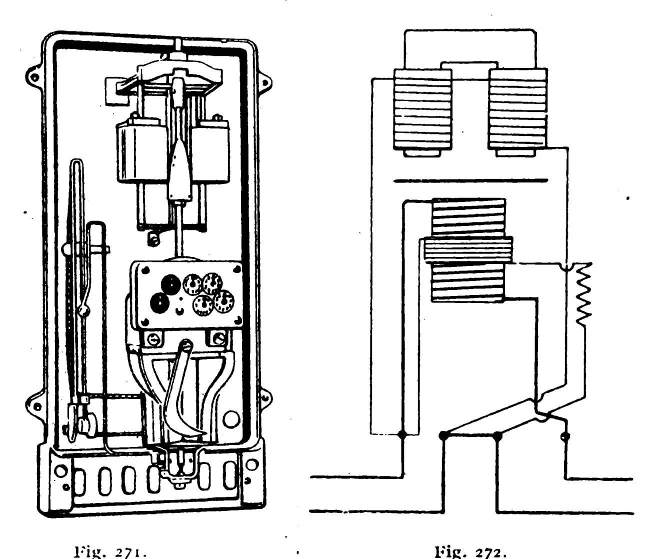


Fig. 271. Fig. 272.

modo que el disco está sometido a un par que tiende a oponerse al propio movimiento del mismo. Este par se regula según el valor correspondiente a la potencia de partida, sirviendo para esta regulación la resistencia en serie.

Contadores de doble tarifa. —Estos contadores tienen dos indicadores, uno para la tarifa de día, y el otro para la tarifa de noche. Un reloj produce, en las horas fijadas para el cambio de tarifa, el engrane de los ejes de propulsión de las agujas con el árbol motor del contador (fig. 273).

La «Compagnie pour la fabrication des compteurs» construye un mecanismo que se puede unir a un contador ordinario (fig. 274); un mecanismo de relojería *Z* mueve la escala graduada o esfera *B*, con lo cual se regula la duración de las distintas tarifas, haciéndole dar una vuelta en 24 horas; una esfera graduada *A* sirve para indicar la hora (las esferas *A* y *B* están graduadas en 12 horas para el día y 12 para la noche, estando marcadas estas últimas en blanco sobre fondo negro).

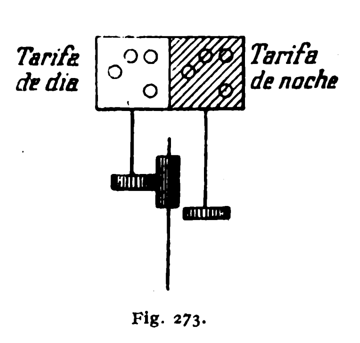


Fig. 273.

Las palancas *I* pueden colocarse frente a las divisiones de la esfera *B* correspondientes a las horas de cambio de tarifa. La aguja de las horas está fijada sobre la esfera *B* con los botones *EE*. Cuando la aguja *D* llega frente a una división de la esfera *A*, correspondiente a una hora de cambio de tarifa, un mecanismo hace engranar instantáneamente el eje del contador con uno de los sistemas totalizadores en el punto correspondiente al otro en aquel momento.

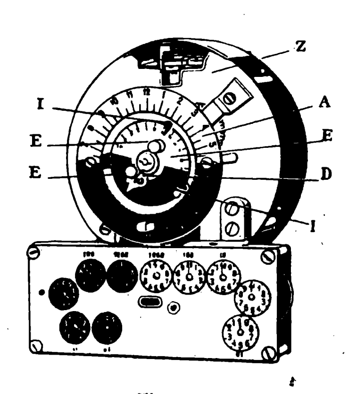


Fig. 274.

Al mecanismo de relojería puede dársele cuerda a mano o automáticamente, por medio de un motor de corriente continua o alterna.

VI. Contadores de energía reactiva

La energía reactiva tomada por una instalación no es registrada por su contador, por no corresponder, en efecto, a una energía suministrada por la central alimentadora.

Pero si el factor de potencia es débil, el defasaje elevado entre la intensidad y la tensión, produce una corriente dewatada importante y lleva consigo perturbaciones molestas sobre toda la red. Es, pues, equitativo cargar a los clientes su parte de gastos y de inconvenientes, que ocasionan con ello, parte proporcional a la energía reactiva tomada por su instalación.

Las compañías concesionarias han acordado, pues, colocar en casa de sus clientes, contadores especiales de energía reactiva.

Contadores monofásicos. — El principio de estos contadores es el siguiente: 1.º Si sobre un disco conductor (cobre o aluminio), móvil alrededor de un eje perpendicular a su plano, se hacen actuar dos flujos alternativos del mismo período Φ_1 y Φ_2 decalados el uno del otro en el ángulo φ, el disco estará sometido a un par que tiende a hacerlo girar alrededor de su eje, y cuyo valor es:

$$C_1 = K_1\Phi_1\Phi_2 \text{ sen } \varphi;$$

2.º Si este par está equilibrado por el par debido a las corrientes de Foucault, inducidas en el disco por un imán permanente, el disco adquirirá una velocidad uniforme ω; el par producido por el imán permanente tiene por valor:

$$C_2 = K_2\omega$$

y será:

$$K_1\Phi_1\Phi_2 \text{ sen } \varphi = K_2\omega.$$

Si se considera un tiempo t durante el cual Φ_1 y Φ_2 conservan el mismo valor, se tendrá:

$$K_1\Phi_1\Phi_2 \text{ sen } \varphi t = K_2\omega t,$$

$$\omega t = \frac{K_1}{K_2}\Phi_1\Phi_2 \text{ sen } \varphi t;$$

3.º Si Φ_1 y Φ_2 son proporcionales, respectivamente, a la tensión eficaz E y a la intensidad eficaz I y si el defasaje de la intensidad respecto a la tensión es igual a φ, se tendrá:

$$\omega t = KEI \text{ sen } \varphi t.$$

Así pues, el número de vueltas ωt dado por el disco es proporcional a la energía reactiva tomada por la instalación con la intensidad I, la tensión E y el factor de potencia cos φ.

Estas condiciones han sido realizadas por diferentes constructores y describiremos, en particular, el *contador seno* de la «Compagnie de constructions électriques».

Un circuito magnético cerrado está envuelto en su lado superior por un arrollamiento de hilo delgado A derivado entre los hilos de la línea y, por consiguiente, recorrido por una corriente i_1 proporcional a la tensión de la red y decalada de ella en un ángulo próximo a los 90º. Sobre esta bobina van arrolladas algunas espiras B de hilo grueso y en serie con ellas, dos bobinas C y D que envuelven dos apéndices fijos a las extremidades del circuito magnético (fig. 275).

Además, otros dos apéndices, dispuestos entre los dos anteriores, van envueltos por un arrollamiento en serie E, recorrido por consiguiente por la misma corriente que alimenta la instalación.

Bajo las cabezas de estos apéndices va el disco móvil de aluminio F, y debajo de este disco una placa

fija de cierre de campo *G*. Entre las extremidades de los apéndices *C* y *D*, atravesando el disco *F* y la placa *G*, pasan dos flujos: uno de ellos Φ_E formado por una derivación del flujo total que recorre el circuito magnético, reforzada por las placas de hierro

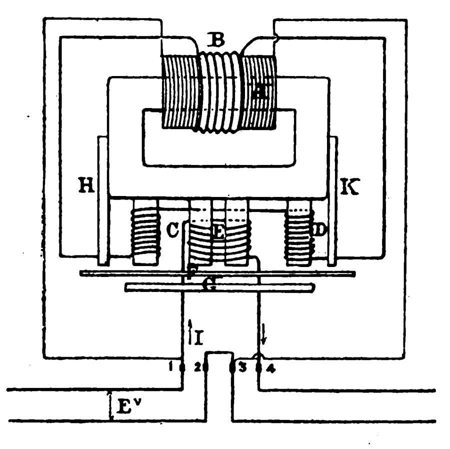


Fig. 275.

dulce *H*, *K*, colocadas a uno y otro lado del electro, y otro Φ'_E engendrado por los arrollamientos *C* y *D*. El primer flujo Φ_E se halla en fase con *i*, el segundo Φ'_E está en fase con la corriente *i'* inducida en *B* por *i* y, por lo tanto, sensiblemente decalado en 90° con relación a *i*, es decir, con un ligero decalado en retraso respecto a *E*.

La construcción y la regulación son tales que la resultante Φ_R de estos dos flujos se halla en fase con *E*.

El arrollamiento en serie *E* produce transversalmente el flujo Φ_I en fase con *I* y defasado con *E* el ángulo φ.

Se ve, pues, que Φ_R y Φ_I (fig. 276), los dos flujos que atraviesan el disco, forman entre sí un ángulo

de 180° — φ y el par que obra sobre el disco será proporcional a:

$$\Phi_R \Phi_I \text{ sen } (180° - \varphi) \qquad \text{o bien:} \qquad \Phi_R \Phi_I \text{ sen } \varphi.$$

Por otra parte, siendo Φ_R y Φ_I respectivamente proporcionales a E e I, este par será proporcional a EI

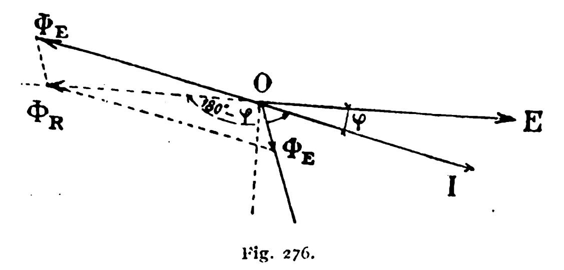


Fig. 276.

sen φ y por lo tanto el número de vueltas dado por el disco durante un cierto tiempo se hallará en razón con la energía reactiva tomada por la instalación durante dicho tiempo.

Verificación. — Como

$$\text{sen}^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1.$$

se puede escribir:

$$E^2 I^2 = E^2 I^2 \cos^2 \varphi + E^2 I^2 \text{sen}^2 \varphi,$$

de donde:

$$E^2 I^2 \text{sen}^2 \varphi = E^2 I^2 - E^2 I^2 \cos^2 \varphi,$$

$$EI \text{ sen } \varphi = \sqrt{E^2 I^2 - E^2 I^2 \cos^2 \varphi}.$$

Esta igualdad muestra que para verificar el contador, será suficiente disponer un amperímetro en la línea, lo que nos dará a conocer I, un voltímetro que nos dará E y un wattímetro que nos dará $W = EI \cos \varphi$, como lo indica la figura 277.

Se alimentará la instalación manteniendo constante la corriente durante t segundos.

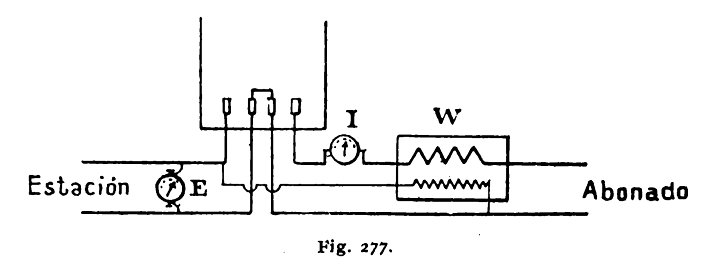


Fig. 277.

Si K es el valor en watts-horas por vuelta del disco, valor indicado en el aparato, la energía registrada por el contador cuando el disco haya dado n vueltas será Kn watts-horas, o:

$$Kn \times 3600 \text{ julios.}$$

La potencia reactiva tomada por la instalación debe ser, pues:

$$EI \operatorname{sen} \varphi = \frac{Kn \times 3600}{t}.$$

Se compara este valor con el de la expresión

$$\sqrt{E^2 I^2 - W^2}$$

y el error en tanto por ciento vendrá dado por:

$$\pm 100 \frac{Kn \times 3600 - \sqrt{E^2 I^2 - W^2}}{\sqrt{E^2 I^2 - W^2}}.$$

Regulación. — 1.° *Parada en vacío.* — En vacío no circula corriente por los arrollamientos serie E; por el contrario, una corriente circula por la bobina A y, por consiguiente, por los arrollamientos C y D; cada uno de ellos origina circuitos elementales cerrados sobre

sí mismos en el disco y obrando los flujos producidos por *C* y *D* sobre estas corrientes que ellos inducen, producen pares iguales y de signo contrario si es que no hay alguna disimetría. Pero si se crea una ligera disimetría, por ejemplo, corriendo la placa de cierre C_I, bien a la derecha, bien a la izquierda, se podrá provocar un movimiento de rotación en vacío. Se utiliza esta acción para crear así un par que compense los rozamientos de arranque sin que por sí mismo provoque la rotación. Un tornillo permite realizar el movimiento lateral de la placa C_I.

2.º *Consumo débil.* — Un avance o un retardo para las cargas débiles se corregirá regulando el par en vacío por un corrimiento lateral de C_I en el sentido conveniente.

3.º *Consumo grande.* — La regulación para las cargas se efectúa por un movimiento de translación de la placa de campo en el sentido vertical sin cambiar en nada su posición en el plano horizontal después de la regulación para las cargas débiles y parada en vacío. Un tornillo permite aproximar la placa al disco para provocar el avance o alejarlo para el retraso.

4.º *Decalado.* — Habiéndose efectuado la regulación sobre un circuito inductivo que presente un decalado de 30º, se regulará el contador para un circuito que presente un decalado diferente aproximando igualmente al disco las piezas de hierro dulce *H* y *K*, para corregir un retraso, y alejándolas para corregir un avance.

VII. Contadores polifásicos

Están basados en el mismo principio que los contadores monofásicos.

Si sobre el disco de aluminio se hace obrar el flujo

producido por una bobina recorrida por la corriente I de alimentación y el flujo producido por una bobina en derivación entre la tensión E, tal que la corriente i que la atraviesa se encuentre en cuadratura con E, el par es proporcional al producto Ii sen $(90^{\circ} - \varphi)$, siendo φ el ángulo de decalado entre I y E, es decir, proporcional a $EI \cos \varphi$.

VIII. Contadores trifásicos de cuatro hilos

Tres pares de bobinas serie y derivación van dispuestas como lo indica el esquema (figs. 278 y 279).

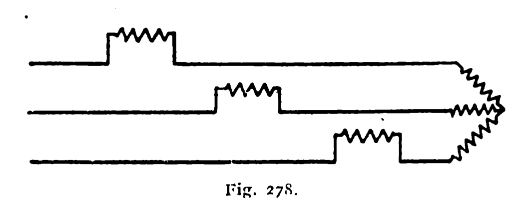


Fig. 278.

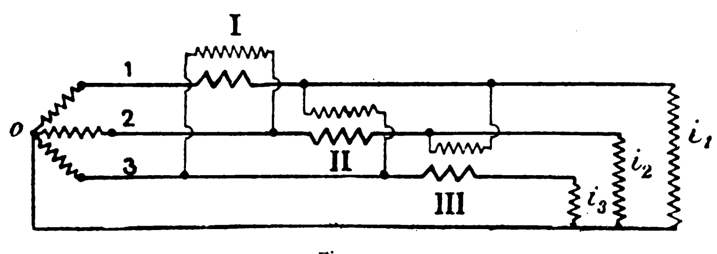


Fig. 279.

Sean, U_1, U_2, U_3 las tensiones de estrella eficaces, U_{12}, U_{23}, U_{31} las tensiones compuestas e I_1, I_2, I_3 las intensidades eficaces.

El grupo I de bobinas produce, según lo que se acaba de decir, sobre el disco, un par proporcional a:

$$(1) \qquad I_1 U_{23} \cos (i_1 U_{23}).$$

Se ve por el diagrama (fig. 280) que si la corriente I_1 está decalada de la tensión U_1 en φ_1 (es decir, si el factor de potencia del circuito I es cos φ_1), el decalado de I_1 sobre U_{23} es $90^\circ - \varphi_1$ y $\cos(i_1, U_{23}) = \cos(90^\circ - \varphi_1) = $ $= \text{sen } \varphi_1$. El par sobre el disco es proporcional a:

$$U_{23} I_1 \text{ sen } \varphi_1,$$

y como $U_{23} = U_1 \sqrt{3}$, el par también será proporcional a:

$$U_1 I_1 \text{ sen } \varphi_1.$$

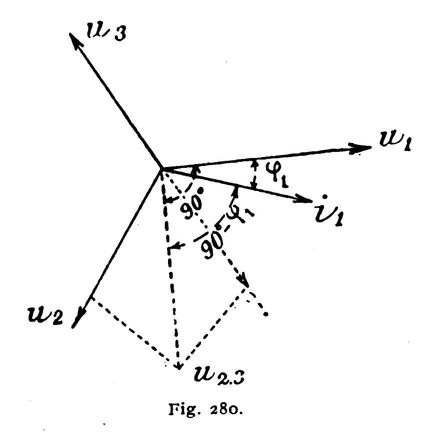


Fig. 280.

De la misma manera los otros dos grupos de bobinas producirán pares proporcionales a $U_2 I_2$ sen φ_2 y $U_3 I_3$ sen φ_3. El disco resultará, pues, sometido a un par resultante, proporcional a:

$$U_1 I_1 \text{ sen } \varphi_1 + U_2 I_2 \text{ sen } \varphi_2 + U_3 I_3 \text{ sen } \varphi_3.$$

Resulta, según lo que acabamos de decir, que el contador registrará la suma de las energías reactivas tomadas por cada uno de los circuitos 1, 2, 3.

IX. Contadores trifásicos de tres hilos

Lo que acaba de ser expuesto relativo a los contadores para la instalación de cuatro hilos (igualdad 1) demuestra que la potencia reactiva es proporcional a la suma de las expresiones:

$$(i_1 u_{23} + i_2 u_{13} + i_3 u_{12}) t,$$

siendo i_1, i_2, i_3 los valores instantáneos de las corrientes, u_{12}, u_{23}, u_{31} los valores instantáneos de las tensiones y t un tiempo infinitamente pequeño.

Como:

$$u_{12} + u_{23} + u_{31} = 0,$$

o sea:

$$u_{12} = - u_{23} - u_{31},$$

será:

$$i_1 u_{23} + i_2 u_{31} + i_3 u_{12} = i_1 u_{23} + i_2 u_{31} - i_3 u_{23} - i_3 u_{31}$$

o lo que es igual:

$$u_{23}(i_1 - i_3) + u_{31}(i_2 - i_3),$$

y como:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \qquad \text{o} \qquad i_3 = - i_1 - i_2,$$

la expresión

$$u_{23}(2 i_1 + i_2) + u_{31}(2 i_2 + i_1),$$

da el valor de la potencia reactiva instantánea, lo que conduce para el contador al montaje dado por la figura 281.

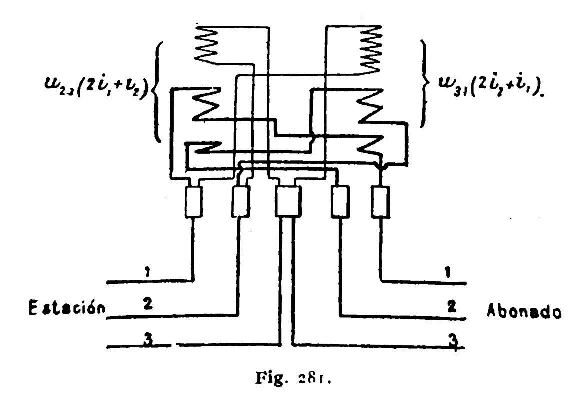


Fig. 281.

En el hilo *1*, por ejemplo, van dos arrollamientos, uno de $2n$ vueltas y otro de n vueltas; en el hilo *2* van igualmente dos bobinas, una de n y la otra de $2n$ vueltas.

El arrollamiento de $2n$ vueltas de 1, el arrollamiento de n vueltas de 2 y un arrollamiento de hilo fino en derivación sobre las líneas 2 y 3, forman un conjunto que produce sobre el disco el par $u_{23}\ (2i_1 + i_2)$.

El arrollamiento de n vueltas de 1, el de $2n$ vueltas de 2 y un arrollamiento de hilo fino en derivación sobre las líneas 3 y 1 producen el par $u_{31}\ (i_1 + 2i_2)$, de tal manera que los dos pares se suman.

Un contador basado en este principio, lo construye la «Compagnie pour la fabrication des compteurs».

Verificación. — Se montan tres wattímetros como indica en esquema la figura 282.

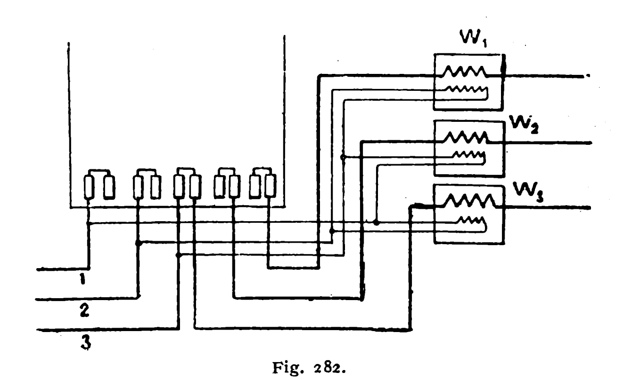


Fig. 282.

Se ve, de acuerdo con lo dicho anteriormente, que estos wattímetros indicarán:

$$U_{23}I_1 \text{ sen } \varphi_1 + U_{31}I_2 \text{ sen } \varphi_2 + U_{12}I_3 \text{ sen } \varphi_3,$$

o bien:

$$W_1 + W_2 + W_3 = \sqrt{3}\ (U_1I_1 \text{ sen } \varphi_1 + U_2I_2 \text{ sen } \varphi_2 + U_3I_3 \text{ sen } \varphi_3),$$

siendo U_1, U_2, U_3 las tensiones de estrella.

Por lo tanto, si el contador ha dado n vueltas en t

segundos, y si K es el número de watts-horas indicado por vuelta del disco, se debe verificar:

$$\frac{Kn \times 3600}{t} = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{\sqrt{3}}.$$

La regulación se efectuará entonces como se ha indicado para los contadores de energía real.

Existen otros montajes que realizan las condiciones necesarias para la integración de la energía reactiva, particularmente el montaje que se indica en la figura 265, pág. 289. El cálculo que se indica explica su funcionamiento y su verificación.

La «Compagnie pour la fabrication des compteurs» construye contadores de energía compleja compuestos de dos contadores, de los cuales uno registra la energía real y otro la energía reactiva, y de un sistema conveniente de engranajes totalizadores: energía real + $\frac{1}{n}$ energía reactiva, siendo n un número dado por la compañía distribuidora de energía.

X. Fasímetros

Los fasímetros son aparatos que dan directamente el valor del factor de potencia cos φ de una instalación; hay varias clases de fasímetros. El que construye la «Compagnie pour la fabrication des compteurs» consiste: 1.º en un electroimán fijo E, con devanado de hilo grueso, que se hace recorrer por la corriente I de línea (fig. 283); 2.º en un sistema móvil de dos cuadros solidarios entre sí, cuyos planos son perpendiculares y cuyos devanados, de hilo fino, están montados en derivación entre los hilos de línea; uno de estos cuadros, C_1, está en serie con una resistencia no induc-

tiva, y es recorrido por una corriente en fase con la tensión U, y proporcional a U; el otro cuadro, C_2 está

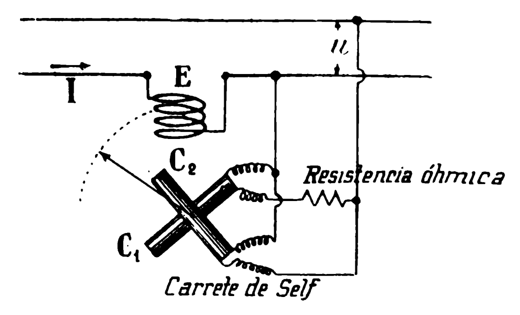


Fig. 283.

en serie con un carrete de reactancia y es recorrido por una corriente proporcional a U, en cuadratura con U.

Hemos visto que cuando el plano de C_1 es perpendicular al de las espiras de E, el cuadro C_1 está sometido a un par de valor (pág. 251):

$$K\,U\,I \cos\varphi.$$

Si el eje del cuadro forma un ángulo α con la dirección del campo creado por el carrete fijo, se puede decir que el par que se ejerce sobre este carrete es aproximadamente (figura 284):

$$K\,U\,I \cos\varphi \operatorname{sen}\alpha.$$

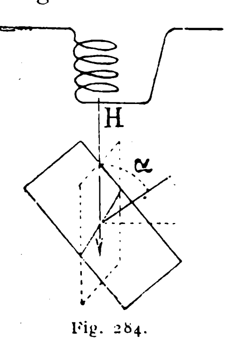


Fig. 284.

Como el carrete C_2 es recorrido por una corriente en cuadratura con U, y como su eje forma un ángulo $90^{\circ} - \alpha$ con la dirección del campo creado por el carrete fijo, el par que se ejerce sobre C_2 será:

$$K\,U\,I \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)$$

o sea:

$$K\,U\,I \text{ sen } \varphi \cos \alpha.$$

Las corrientes llegan a los cuadros por hilos de poca sección, de modo que el par que desarrollan es despreciable, tomando el sistema móvil una posición de equilibrio cuando los dos pares son iguales, es decir, cuando:

$$K\,U\,I \cos \varphi \text{ sen } \alpha = K\,U\,I \text{ sen } \varphi \cos \alpha,$$

de donde:

$$\text{tg } \alpha = \text{tg } \varphi, \quad \text{o sea:} \quad \alpha = \varphi.$$

Por consiguiente, la desviación de la aguja accionada por los cuadros móviles es proporcional al defasaje φ, y se podrá escribir frente a las diferentes posiciones de la aguja los valores de $\cos \varphi$.

Claro está que esta proporcionalidad no es rigurosamente exacta; sin embargo, los aparatos construídos dan indicaciones bastante precisas con una aproximación mayor del 2 %.

La resistencia óhmica y el carrete con autoinducción están dispuestos en una caja independiente del fasímetro; cuando es necesario, el carrete de hilo grueso está alimentado por el secundario de un transformador de intensidad, y los cuadros móviles por un transformador de potencial. El montaje, en este caso, es el indicado en la figura 285.

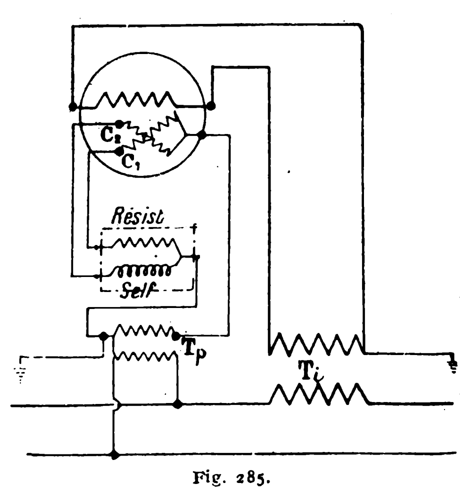


Fig. 285.

Fasímetro para corriente trifásica de circuitos equilibrados. —Se trata de hacer que el aparato indique el factor de potencia de uno de los circuitos alimentados por las líneas. Para ello, según lo expuesto, se hace recorrer el carrete fijo por la corriente de una línea, y los carretes móviles deberán ser alimentados bajo la tensión en estrella, uno por una corriente en fase con la tensión correspondiente a la lí-

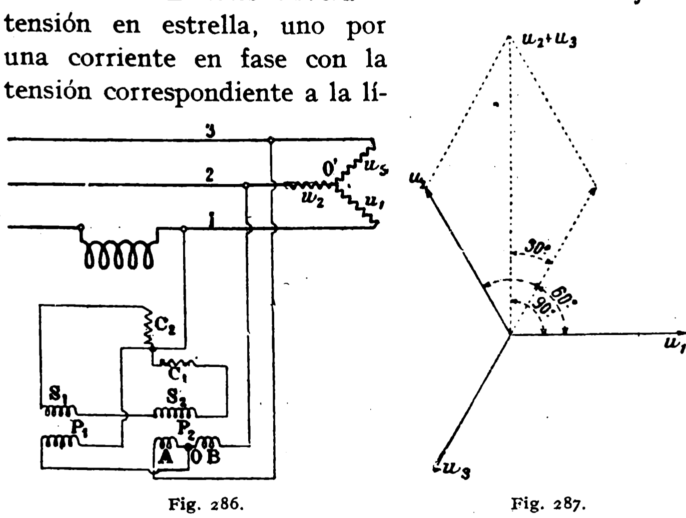


Fig. 286. Fig. 287.

nea 1, en la cual está el carrete fijo, y el otro por una corriente en cuadratura con esta tensión. Con este fin, los dos cuadros están alimentados por los secundarios de dos pequeños transformadores en los cuales los primarios están dispuestos como indica la figura 286.

El primario P_1 está bajo la tensión en estrella u_1, correspondiente a la línea 1; el primario P_2 está dividido en dos partes iguales, A y B, alimentada la primera bajo la tensión en estrella u_2, correspondiente a la línea 2, y la otra bajo la tensión en estrella u_3, correspondiente a la línea 3. La corriente en P_2 se debe, por lo tanto, a la resultante de las tensiones u_2 y u_3, viéndose en la gráfica de la figura 287, que esta resul-

tante está en cuadratura con u_1, de modo que las corrientes en P_1 y en P_2 están defasadas en 90°; si una está en fase con la corriente en la línea 1, la otra está en cuadratura con esta corriente. Estos dos transformadores están colocados en una caja independiente.

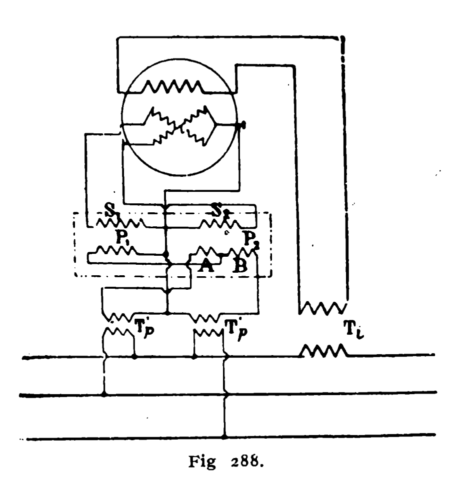


Fig. 288.

El carrete de hilo grueso puede ser alimentado por el secundario de un transformador de intensidad T_i, y los dos primarios P_1 y P_2 de los transformadores de la caja, por los secundarios de transformadores de potencial T_p y T'_p. El montaje es el indicado por la figura 288.

XI. Frecuencímetros

Son aparatos que indican el número de períodos por segundo de una corriente alterna. Entre los diferentes aparatos de esta clase hay uno fundado en un principio de Acústica, constituído por una serie de láminas vibrantes fijadas por un solo extremo, cada una con un período particular de oscilación, determinado por sus dimensiones. Estas láminas están situadas frente a un electroimán, cuyo carrete está recorrido por la corriente cuya frecuencia se quiere medir. Bajo la influencia de esta corriente, y por lo tanto, de las imanaciones y desimanaciones cuyo número por se-

gundo es igual a la frecuencia de la corriente, experimentan estas láminas una serie de atracciones y entran en vibración; las láminas cuyo período de oscilación es diferente del período de la corriente, reciben una serie de impulsiones muy pequeñas, quedando inmóviles. Al contrario, la lámina cuyo período propio de oscilación es igual al de la corriente, recibe fuertes impulsiones, entrando en franca vibración; frente a esta lámina está escrita la frecuencia correspondiente. Claro está que siempre entran en vibración

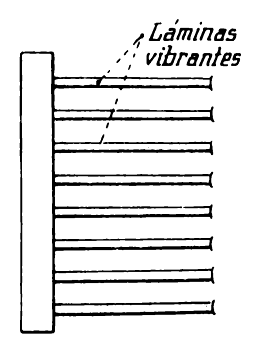


Fig. 289. — Disposición de las láminas vibrantes.

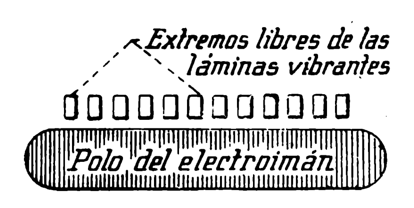


Fig. 290.

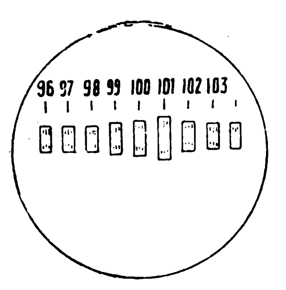


Fig. 291. — El frecuencímetro indica una frecuencia de 101.

dos o tres lengüetas próximas a esta última, pero lo hacen de un modo mucho más débil (figuras 289 a 291).

Este aparato ha sido construído por Hartmann y Braun.

EJERCICIOS

Estudio de un contador monofásico

La constante del contador, es decir, el número de watts-hora indicado, por vuelta, está marcado en el aparato.

1.º Cargar el contador sobre un circuito de lámparas,

cuyo factor de potencia es, por consiguiente, igual a la unidad; determinar para diferentes cargas el error relativo (error en tanto por 100), y trazar una curva cuyas abscisas sean las cargas, y las ordenadas los errores.

2.º Hacer lo mismo cargando el contador sobre un circuito inductivo; determinar el factor de potencia de este circuito por medio de un wattímetro, de un amperímetro y de un voltímetro.

3.º Regular el contador para una cierta potencia, y volver a trazar la curva de errores.

4.º Mantener constante la carga, hacer variar la frecuencia de la corriente y estudiar mediante una curva la variación del error al variar la frecuencia.

Estudio de un contador trifásico

Hacer lo mismo que en el caso anterior, operando:

1.º Con lámparas, estando las fases igualmente cargadas, y después cargadas desigualmente.

2.º Con lámparas y carretes de reactancia, de modo que se obtenga un defasaje.

CAPÍTULO XIII

Aparatos de comparación

La comprobación o verificación de los voltímetros, amperímetros, wattímetros, contadores de cuadros de distribución, etc., se hacen industrialmente por medio de los aparatos llamados de comparación o comprobación (de *contrôle*), que deben servir para medidas entre límites bien extensos, han de ser precisos y estar siempre regulados, debiendo además ser fácilmente transportables y de sencillo manejo. Los constructores emplean con este fin aparatos electromagnéticos (o ferroeléctricos), magnetoeléctricos (imán fijo y cuadro móvil), y electrodinámicos (electrodinamómetros).

I. — Aparatos electromagnéticos o ferroeléctricos

Estos aparatos están constituídos por una pieza de hierro dulce o polarizable, que se mueve bajo la acción de una corriente que recorre un carrete; este movimiento se transmite a una aguja por una serie de palancas.

Estos aparatos son fuertes, muy fijos, y pueden emplearse con corrientes continuas y alternas.

Para que estos aparatos tengan una extensión conveniente de medida, se construyen amperímetros con shunts en condiciones tales que las causas de error debidas a las variaciones de frecuencia y tempe-

ratura quedan eliminadas, y voltímetros con resistencias en serie.

Amperímetros con shunt. — El carrete debe ser recorrido por una corriente de elevada intensidad, del orden de 10 amperes, para reducir el número de espiras; este carrete está en serie con una resistencia interior (fig. 292) y el sistema de carrete y resistencia está derivado entre los extremos de un shunt recorrido por la corriente que se mide. Las resistencias de los diferentes shunts son tales que cada uno de ellos produce una caída de tensión de 500 milivolts, cuando la corriente que los recorre es la correspondiente a la desviación total de la graduación; la tensión en los extremos del carrete es en este caso de 100 milivolts, y en los extremos de la resistencia, de 400 milivolts. En estas condiciones, los errores, tanto con corriente continua como alterna de 25 a 50 períodos, no llegan al 1 %.

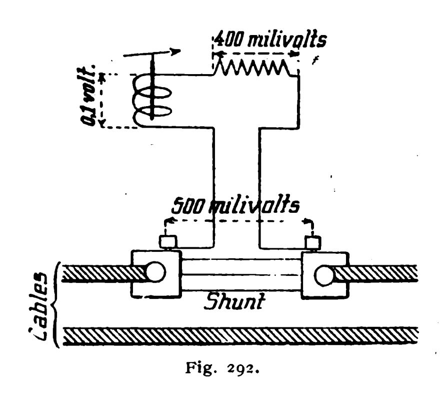


Fig. 292.

La sensibilidad está reducida a 5 amperes por la división del carrete en dos devanados, que pueden ponerse en serie o en paralelo mediante un conmutador. Cuando están en paralelo y el circuito total es recorrido por 10 amperes, cada devanado es recorrido por 5 amperes, y la aguja recorre toda la graduación; de este modo se tiene una medida directa sin shunts, para 5 a 10 amperes. Si los dos devanados se ponen en serie, son recorridos ambos por 5 amperes,

cuando la corriente medida es de 5 amperes, y la aguja se desvía también recorriendo toda la graduación, con lo cual se pueden medir corrientes de 2 a 5 amperes.

El conmutador no debe intercalar en los circuitos más que resistencias de contacto pequeñas e invariables, para lo cual se construye con muchas precauciones; este conmutador está formado por dos sectores dispuestos en coronas, unidos entre sí de módo que se tenga el acoplamiento en serie o en paralelo de los devanados, mediante una clavija doble, que se introduce a frotamiento fuerte en el cono formado por las superficies de los sectores, cuidadosamente pulimentadas.

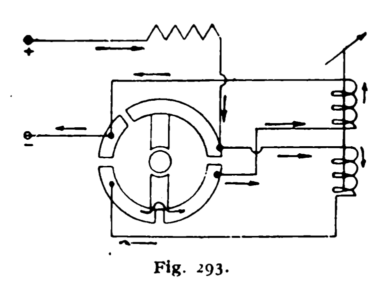


Fig. 293.

La entrada y salida de las clavijas se hace con dos tornillos, y las dos posiciones de la clavija están determinadas por topes colocados a 90° uno de otro. Por ejemplo, si la clavija está en la posición correspondiente a la sensibilidad de 10 amperes (fig. 293) para pasar a la sensibilidad de 5 amperes (fig. 294) se dan vueltas a la cabeza roscada de la clavija de modo que ésta salga de su alojamiento, y se introduce en la posición 5 amperes, apretándola contra las paredes de los sectores atornillando su cabeza.

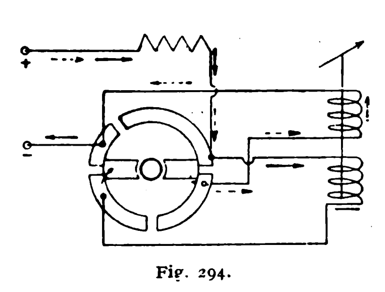


Fig. 294.

De este modo se tienen sin shunts unos límites de

medida de 2 a 10 amperes, y con shunts de 500 milivolts se obtienen sensibilidades correspondientes a 30, 100, 300... amperes.

Con el voltímetro se puede, como ya hemos indicado, medir corrientes inferiores a 2 amperes, con sensibilidades de 1,5 y 0,1 amperes.

Voltímetro de varios alcances. — El carrete lleva dos devanados en serie, y en serie a su vez con resistencias divididas, pudiéndose medir voltajes de distintos órdenes de magnitud: 75, 150, 300 volts (fig. 295).

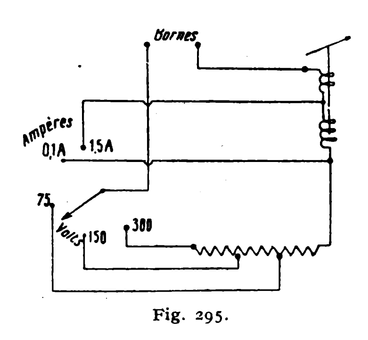


Fig. 295.

Este aparato puede servir como amperímetro para pequeñas intensidades; para las corrientes de 0,1 a 1,5 amperes sólo se utiliza uno de los devanados del carrete, obteniéndose la desviación total de la aguja sobre la escala para 1,5 amperes. Para intensidades inferiores a 0,1 ampere, se utilizan los dos devanados que dan la desviación total de la aguja para 0,1 amperes.

II. — Aparatos de cuadro móvil e imán fijo o magnetoeléctricos

Estos aparatos ya los hemos descrito extensamente en el tomo I, GENERALIDADES (Cap. IX). Son amperímetros con shunts y voltímetros de varios alcances obtenidos mediante una resistencia subdividida dispuesta en el interior, en serie con el cuadro móvil. Estos aparatos dan todas las garantías necesarias para las comprobaciones, pero tienen el inconveniente

de no poderse emplear más que con corrientes continuas.

Se puede emplear solamente un aparato, un milivoltímetro, que con una serie de shunts constituye un amperímetro y con una caja de resistencias un voltímetro. La casa Chauvin - Arnoux construye un milivoltímetro que permite corregir los errores debidos a las variaciones de temperatura. Un shunt magnético, cuya posición respecto a los polos del imán puede regularse por medio de un botón colocado por fuera (figs. 296 y 297) hace variar el flujo a través del cuadro móvil proporcionalmente a la variación de resistencia del circuito de este cuadro con la temperatura dada por un termómetro y marcada sobre el botón frente a un índice fijo.

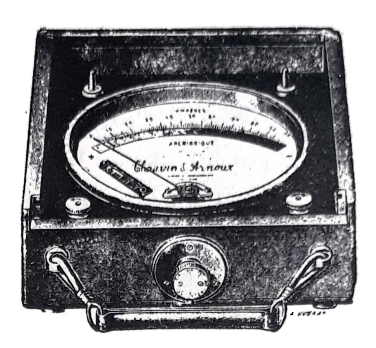


Fig. 296. — Milivoltímetro de Chauvin y Arnoux.

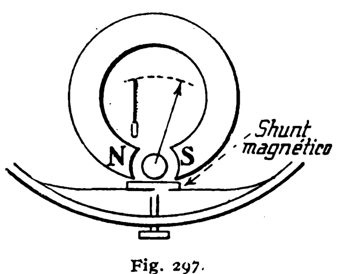


Fig. 297.

Estos aparatos deben colocarse preferentemente en una posición horizontal al hacer las medidas.

Se construyen milivoltímetros tipos cuyo coeficiente de temperatura queda anulado con el dispositivo de la figura 298 en la que r_1 y r_2 son resistencias de manganina cuyo coeficiente de temperatura es nulo; r_3 es una resistencia de cobre, y g es la resistencia del cuadro galvanométrico, también de cobre.

Las variaciones de temperatura no tienen efecto

sobre la corriente en el cuadro, cuando $gr_3 = r_1 r_2$, condición que queda satisfecha en estos aparatos. En efecto: sea u la tensión aplicada entre los bornes A y B; la corriente en el cuadro es:

$$i = \frac{u}{r_2 + \frac{(r_1 + g)\,r_3}{r_1 + r_3 + g}} \times \frac{r_3}{r_1 + r_3 + g},$$

o sea:

$$i = u \frac{r_3}{r_1 r_2 + r_2 (r_3 + g) + r_1 r_3 + r_3 g}.$$

Si la temperatura sube t^o, los valores de r_1 y r_2 no varían, mientras que las resistencias r_3 y g se convierten en las siguientes: $r_3\,(1 + at)$, y $g\,(1 + at)$, siendo a el coeficiente de temperatura del cobre.

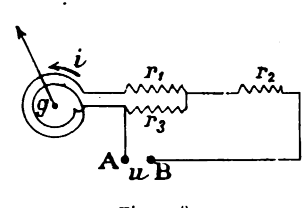


Fig. 298.

Por consiguiente, la corriente en el cuadro será:

$$i' = u \frac{r_3 (1 + at)}{r_1 r_2 + r_2 (r_3 + g)(1 + at) + r_1 r_3 (1 + at) + r_3 g (1 + at)^2}$$

o sea:

$$i' = u \frac{r_3}{\frac{r_1 r_2}{1 + at} + r_2 (r_3 + g) + r_1 r_3 + r_3 g (1 + at)}.$$

y puesto que $r_1 r_2 = r_3 g$, se tendrá:

$$i' = u \frac{r_3}{r_2 (r_3 + g) + r_1 r_3 + r_1 r_2 \left(\frac{1}{1 + at} + 1 + at\right)}$$

Ahora bien, se sabe que a causa del pequeño valor de a, que es igual a 0,004, se tiene:

$$\frac{1}{1 + at} = 1 - at,$$

luego:

$$\frac{1}{1 + at} + 1 + at = 1 - at + 1 + at = 2$$

y la corriente i' tendrá el mismo valor que i, independiente de t:

$$i' = i = u \frac{r_3}{r_2 (r_3 + g) + r_1 r_3 + 2 r_1 r_2},$$

teniendo presente, como hemos dicho, que $r_1 r_2 = r_3 g$.

III. — Aparatos electrodinámicos

Se sabe que los electrodinamómetros (pág. 148) están constituídos por un carrete móvil recorrido por una corriente y sometido a la acción del campo magnético creado por un carrete fijo, recorrido también por una corriente (carrete de campo).

Estos aparatos pueden emplearse tanto con corriente alterna como continua, siendo su precisión comparable a la de los aparatos de imán y cuadro móviles.

Para tener aparatos de comprobación que satisfagan las exigencias de la práctica industrial, la casa Carpentier los ha construído para límites bien extensos de medida, multiplicando sus alcances «amperes» por medio de carretes de campo fijos. Estos carretes, contenidos en bloques cúbicos huecos, pueden introducirse, guiados por deslizaderas metálicas, en un alojamiento practicado en la caja del aparato, de modo que rodeen a la parte móvil, y que sus ejes lleguen a coincidir con el del carrete móvil.

Amperímetros. — El montaje se hace como indica la figura 299. El carrete fijo es recorrido directamente por la corriente que se mide I; el carrete móvil se pone en derivación con un shunt de manganina, a través de una resistencia en serie. Sea s la resistencia

del shunt; entre los extremos de esta resistencia hay una d. d. p. sI volts y la corriente en el cuadro móvil es: $i = \frac{sI}{R + r}$, siendo r la resistencia del cuadro y R la resistencia en serie. El par que obra sobre el carrete

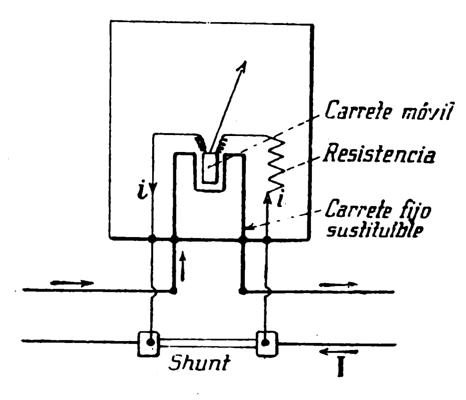


Fig. 299.

fijo es aproximadamente proporcional al producto $I \times i$, y como R y r son constantes para un valor dado de s, este par tiene por valor KI^2.

Se puede graduar la escala de amperes. Sobre cada uno de los carretes de campo hay un número, por el cual bastará multiplicar la indicación de la aguja para tener el valor de la corriente medida.

Para que la precisión del aparato sea suficiente, es necesario que la resistencia de shunt produzca una caída de tensión bastante grande; esta caída es de 0,5. Sería conveniente que fuera más elevada esta caída, de 1 volt aproximadamente, pero entonces el aparato gastaría demasiado.

Para las corrientes alternas se ha logrado salvar esta dificultad empleando un pequeño transformador cuyo primario está en derivación en los extremos del shunt

y cuyo secundario alimenta el carrete móvil a través de una resistencia en serie (fig. 300).

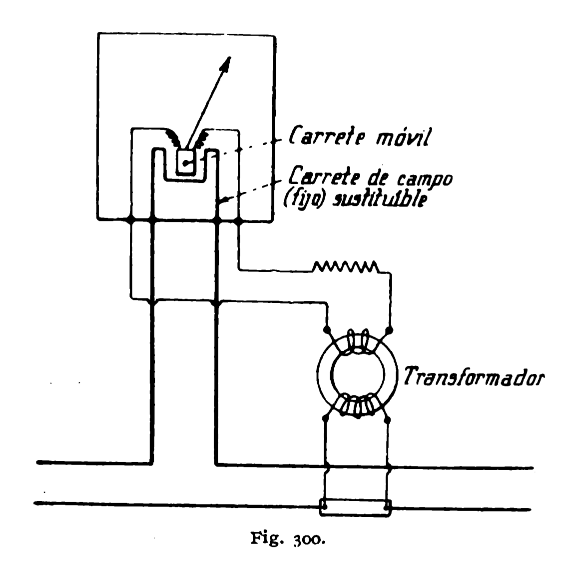


Fig. 300.

Voltímetro. — El carrete de campo se pone en serie con el carrete móvil y una resistencia exterior subdividida de modo que se puedan tener varios alcances o sensibilidades (fig. 301).

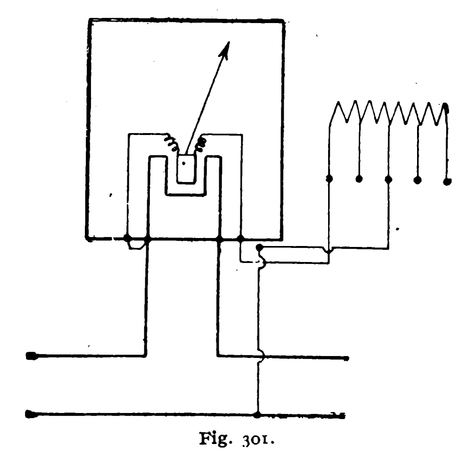


Fig. 301.

Wattímetro. — En este aparato hay una serie de carretes de campo fijos, para intensidades variables, y una resistencia exterior subdi-

vidida para diferentes tensiones. La potencia se obtiene multiplicando la cifra leída sobre la escala frente a la aguja, por el producto de los coeficientes marcados sobre el carrete de campo y sobre la resistencia adicional. El montaje es el representado por la figura 302.

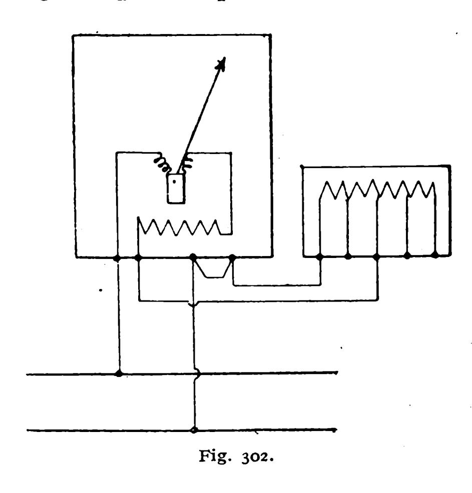


Fig. 302.

Electrodinamómetro universal.—Los amperímetros, voltímetros y wattímetros pueden agruparse en un mismo aparato que contiene: un carrete móvil, una serie de carretes de campo fijos, un pequeño carrete de campo llamado voltímetro, una caja con una resistencia subdividida y un combinador con el cual se pueden hacer las conexiones necesarias para la medición de los amperes, de los volts y de los watts. El montaje es el indicado por la figura 303. Cuando la palanca del combinador está frente a la letra *V* (figs. 303 y 304), los bornes *V* están unidos entre sí, así como también los *c* y *a*, *M* y *N*, el carrete fijo C_1 está entonces en cortocircuito por los contactos *c* y *a*, y se ve que los carretes voltimétricos *C* y móvil C_2 están, para la tensión de la línea, en serie con una resistencia determinada *DE*. Cuando la aguja indica la tensión, la palanca se lleva sobre *A*, quedando de este modo unidos entre sí los bornes *A* así como los *b* y *a*, mientras que los *M* y *N* quedan separados; se ve de este modo que la corriente de línea pasa por el

carrete C_1, que el primario del transformador T está conectado entre los extremos del shunt s y que el

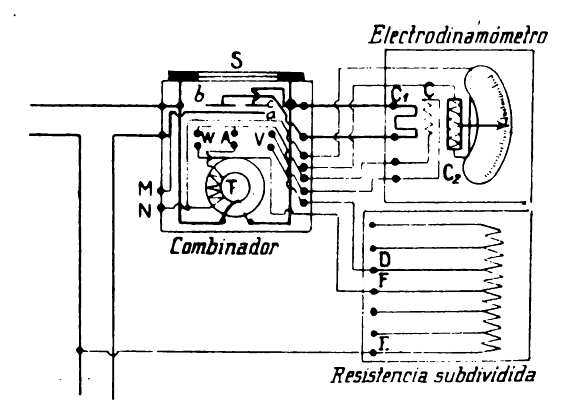


Fig. 303.

carrete C_2 está derivado entre los extremos del secundario; la aguja indica la corriente en la línea.

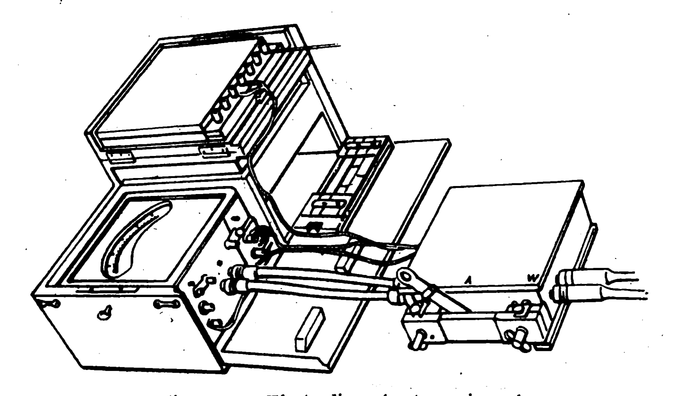


Fig. 304. — Electrodinamómetro universal.

Finalmente, si se lleva la palanca frente a la letra W, quedan unidos b y a, así como los bornes W y los M y N; en estas condiciones, la corriente de línea

pasa por C_1; el carrete C_2, en serie con una resistencia determinada FE, está derivado bajo la tensión de la línea: la aguja da la potencia absorbida por los aparatos alimentados por la línea.

IV. — Contadores tipos

Resulta muy cómodo el comprobar los contadores por medio de contadores tipos que tienen todas las propiedades de los aparatos patrones: precisión, soli-

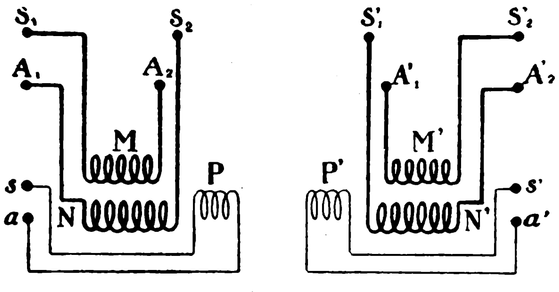


Fig. 305.

dez y límites bien amplios de medida. La «Compagnie pour la fabrication des compteurs» construye para la comprobación de los contadores de corriente alterna un tipo o patrón contenido en una caja portátil, compuesto de dos elementos wattímetro, cada uno de los cuales lleva dos carretes de intensidad y uno de tensión. Los carretes de intensidad de cada uno de ellos, MN y $M'N'$, pueden ponerse en serie o en paralelo y cada uno de estos dos grupos puede montarse en serie o en paralelo (fig. 305). Los devanados de tensión P y P' pueden unirse en serie o en paralelo y derivarse separadamente sobre tensiones distintas. A cada uno de estos acoplamientos de los carretes de intensidad

y de los carretes de tensión corresponde una constante dada por una tabla que acompaña al aparato.

Por ejemplo, para comprobar un contador mono-

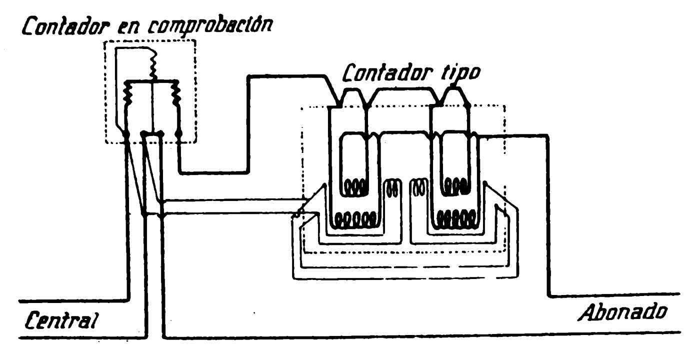


Fig. 306.

fásico 20 amperes, 110 volts, se ponen los cuatro carretes de intensidad en paralelo, así como los dos carretes

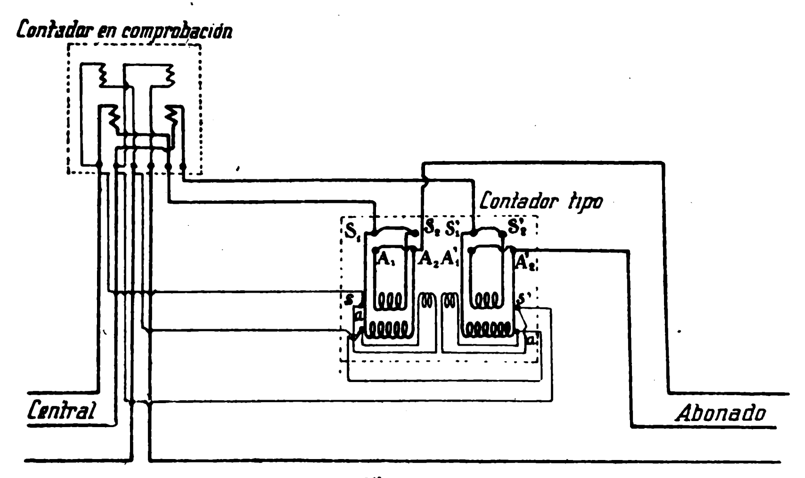


Fig. 307.

de tensión, y la constante es 2. El montaje es el indicado en la figura 306.

Para la comprobación de un contador trifásico, no equilibrado, de 10 amperes y 110 volts, la derivación se hace por el método de los dos wattímetros; los dos carretes de intensidad de un grupo están en paralelo y ambos en un hilo de línea, y los dos carretes de intensidad del otro grupo están también en paralelo y en un segundo hilo de línea, estando cada uno de los carretes de tensión sobre las tensiones convenientes (fig. 307).

CAPÍTULO XIV

Medida de capacidades

I.—Medida por comparación con una capacidad patrón

PRIMER MÉTODO. — **Comparación de las cargas tomadas por los dos condensadores.** — El condensador, cuya capacidad x se quiere medir, se carga por una pila de fuerza electromotriz E y tomará una carga $Q = x\,E$; al descargarlo en un balístico resulta una elongación θ; se tendrá:

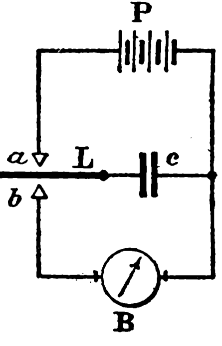


Fig. 308.

$$xE = K\,\theta,$$

siendo K la constante del balístico.

Se carga en seguida con la misma pila el condensador patrón de capacidad C conocida y se le descarga en el balístico, lo que dará una elongación θ' y será:

$$CE = K\,\theta',$$

de donde:

$$\frac{x}{C} = \frac{\theta}{\theta'} \quad \text{y} \quad x = C\,\frac{\theta}{\theta'}.$$

OBSERVACIÓN I. — Para que la constante *K* sea la misma en las dos operaciones, es necesario que las condiciones de amortiguamiento permanezcan iguales (pág. 22).

OBSERVACIÓN II. — La carga admitida por un condensador aumenta con el tiempo de duración de su carga; es preciso, pues, que esta duración sea la misma para las dos capacidades que se comparan. En general, es muy corta y el condensador toma lo que se llama la «carga instantánea».

De la misma manera la descarga no se verifica instantáneamente de una manera completa, y como la impulsión que recibe el equipo móvil del balístico no debe durar más que un tiempo muy corto para que la elongación sea proporcional a la cantidad de electricidad que lo ha atravesado, la descarga debe ser asimismo instantánea.

La descarga instantánea es desde luego igual a la carga instantánea, de manera que se pueden comparar las dos capacidades midiendo las elongaciones producidas en el balístico, tanto por las cargas como por las descargas.

OBSERVACIÓN III. — Es de mucha importancia que los condensadores, los conductores y los aparatos se encuentren perfectamente aislados, sin lo cual se producirían derivaciones que falsearían los resultados. Se puede comprobar este aislamiento midiendo las elongaciones producidas, de una parte, por la carga y, de otra parte, por la descarga: ambas deben ser iguales. Si se encuentra una diferencia importante es preciso buscar el defecto de aislamiento en el montaje; si por el contrario difieren poco, se considera el aislamiento como suficiente y se toma como valor de la elongación la media de las que dan la carga y la descarga.

Montaje. — Para efectuar la medida teniendo en cuenta las condiciones que acaban de ser indicadas, se puede realizar el montaje que indica la figura 309, en la cual: *B* es el balístico shuntado por una resistencia conveniente *S*, *x* es la capacidad que se quiere medir, *C* la capacidad patrón, *P* la batería de pilas 1, 2, 1′, 2′, 3, 4, 3′, 4′, *a* y *b* pocillos ahuecados en un bloque de parafina y conteniendo mercurio, los cuales se pueden comunicar por caballeros de cobre perfectamente aislados. Se operará de la manera siguiente:

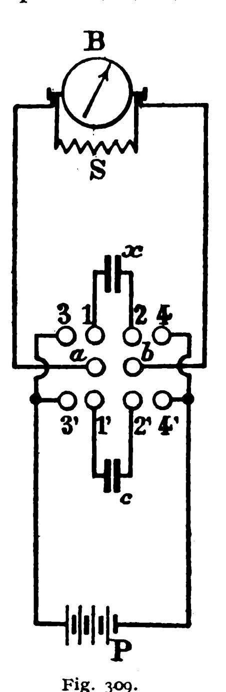


Fig. 309.

1.º Caballeros *2-4* y *1-3*, carga de *x*;

2.º Caballeros *1-a* y *2-b*, descarga de *x* a través del balístico, lectura de la elongación θ_1;

3.º Caballeros *2-4*, *1-b* y *3-a*, carga de *x* a través del balístico, lectura de la elongación θ_2.

Siendo θ_1 y θ_2 poco diferentes, se tomará:

$$\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}.$$

Después:

4.º Caballeros *2′-4′* y *1′-3′*, carga de *C*.

5.º Caballeros *1′-a* y *2′-b*, descarga de *C* a través del balístico, lectura de la elongación θ'_1;

6.º Caballeros *2′-4′*, *1′-b* y *3′-a*, carga de *C* a través del balístico, lectura de la elongación θ'_2.

Se tomará:

$$\theta' = \frac{\theta_1' + \theta_2'}{2}.$$

Finalmente:

$$x = C \frac{\theta}{\theta'}.$$

SEGUNDO MÉTODO. — **Comparación de las desviaciones permanentes de un balístico recorrido por las descargas repetidas de cada uno de los dos condensadores.** — Consideremos un condensador de capacidad C, que puede ser cargado por una pila P cuando una lámina vibrante L se pone en contacto con el tope a y descargado en un balístico cuando la lámina toca al tope b (fig. 310). A cada vibración la carga CE ($E =$ fuerza electromotriz de la pila) tomada por el condensador atraviesa el balístico en la descarga. Si la lámina hace n vibraciones por segundo, la cantidad de electricidad que atraviesa el balístico por segundo será nCE; si, por otra parte, las vibraciones de la lámina son lo suficientemente rápidas para que el intervalo de tiempo que separa dos descargas sucesivas sea inferior a la duración de una oscilación simple del balístico, éste adquirirá una desviación permanente θ, y esta desviación será la misma que la que produciría una corriente continua:

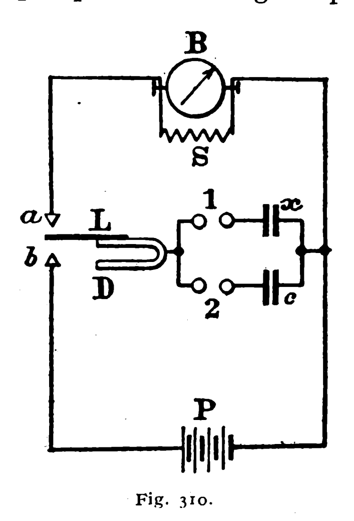


Fig. 310.

$$I = nCE.$$

Si K es la constante del balístico en régimen permanente, se tendrá:

$$nCE - K\theta.$$

Operando con otro condensador de capacidad C' cargado por la misma pila de fuerza electromotriz E y descargado el mismo número de veces n por segundo, se obtendrá una desviación permanente θ' tal que:

$$n C' E = K \theta',$$

de donde:

$$\frac{C}{C'} = \frac{\theta}{\theta'}.$$

Montaje. — Para medir la capacidad x con ayuda de la capacidad patrón C, se realizará el montaje indicado por la figura 310, la vibración de la lámina se obtiene por un diapasón D.

Uniendo por un caballero los pocillos *1* y haciendo vibrar el diapasón, se lee la desviación θ del balístico, luego se coloca el caballero conectando los pocillos *2* y manteniendo la vibración del diapasón, se lee la desviación θ'.

Se tiene:

$$\frac{x}{C} = \frac{\theta}{\theta'} \qquad x = C \frac{\theta}{\theta'}.$$

OBSERVACIÓN. — Las vibraciones de la lámina deben ser lo suficientemente rápidas para que la condición que hemos indicado sea realizada; sin embargo, la duración de la oscilación debe ser lo bastante larga para que las cargas sean completas. Se comprobará este hecho disponiendo sobre una de las ramas del diapasón una pequeña masa corrediza a lo largo de la rama, de modo que permita variar, con la nota emitida, la duración de las oscilaciones.

Si para las diferentes posiciones de esta masa el resultado obtenido no varía, todas las condiciones requeridas para una medición conveniente estarán bien satisfechas.

TERCER MÉTODO. — **Empleo del puente: montaje de De Sauty.** — Los dos condensadores cuyas capacidades se quieren comparar van dispuestos en dos ramas del puente, como lo indica la figura 311. Las resistencias de las ramas AB y AD se regulan de tal manera que después de apretar el botón *1* de la pila, el balístico no experimenta impulsión alguna al apretar el botón *2*. Cuando esta condición se realiza, las resistencias de las ramas AB y AD tienen unos valores r y r' tales que:

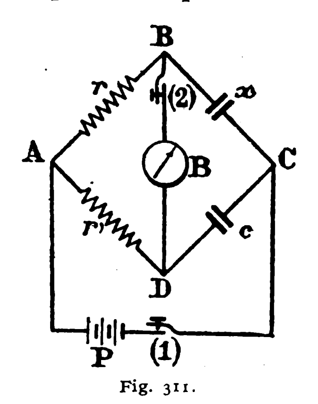


Fig. 311.

$$\frac{x}{C} = \frac{r'}{r}, \quad x = C\frac{r}{r'}.$$

En efecto, cuando no pasa cantidad alguna de electricidad por el balístico, el condensador de capacidad x toma una carga xE (E = fuerza electromotriz de la pila) y esta carga es igual a la cantidad de electricidad que atraviesa la resistencia AB. Sea i la corriente de AB en un cierto instante; durante un tiempo infinitamente pequeño t correspondiente a este instante, la cantidad de electricidad que atraviesa AB y llega al condensador es it, y si se efectúa la suma de todas las cantidades it durante todo el tiempo de carga, se tendrá, evidentemente:

$$\Sigma it = xE.$$

De la misma manera, siendo i' la corriente en un cierto instante de la rama AD, se tendrá:

$$\Sigma i't = CE,$$

de donde:

(1) $$\frac{x}{C} = \frac{\Sigma it}{\Sigma i't}.$$

Por otra parte, puesto que no pasa cantidad alguna de electricidad por la rama *BD*, quiere decir que los dos puntos *B* y *D* se encuentran al mismo potencial, o sea que en todo momento de la descarga las diferencias de potencial entre *A* y *B*, de una parte, y entre *A* y *D*, de otra, son iguales.

Sean pues, i_1, i_2, i_3... las corrientes en *AB* a intervalos de tiempo iguales infinitamente pequeños *t*, e i'_1, i'_2, i'_3... las corrientes en *AD* en los mismos instantes, se tendrá:

$$r i_1 = r' i_1', \quad r i_2 = r' i_2', \quad r i_3 = r' i_3' \ldots$$

o bien:

$$\begin{aligned} r i_1 t &= r' i_1' t \\ r i_2 t &= r' i_2' t \\ r i_3 t &= r' i_3' t \\ \vdots \quad & \quad \vdots \end{aligned}$$

y sumando miembro a miembro estas igualdades:

$$r(i_1 t + i_2 t + i_3 t + \ldots) = r'(i_1' t + i_2' t + i_3' t + \ldots),$$

o sea:

$$r \Sigma i t = r' \Sigma i' t,$$

es decir:

$$\frac{r}{r'} = \frac{\Sigma i' t}{\Sigma i t}, \qquad (2)$$

y comparando las relaciones (1) y (2):

$$\frac{x}{C} = \frac{r'}{r}, \quad x = C \frac{r'}{r}.$$

CUARTO MÉTODO. — **Empleo del puente: montaje de J. Thomson.** — Los condensadores, la pila y el balístico van dispuestos en el puente como lo indica la figura 312; se regulan las resistencias de las ramas *AB* y *AD* de manera que, después de haber apretado el

botón de la pila, no se produzca ningún movimiento del balístico al apretar su botón.

Si r y r' son las resistencias de las ramas AB y AD, se tiene:

$$x = C\frac{r}{r'}.$$

En efecto, puesto que ninguna cantidad de electricidad atraviesa a AC, los puntos A y C se hallarán al mismo potencial y las corrientes de AB y AD serán iguales.

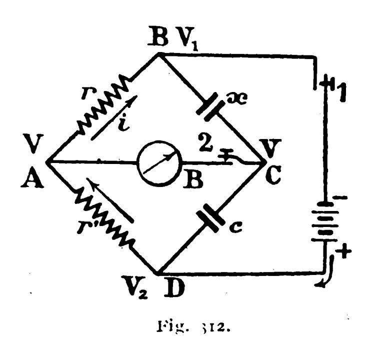


Fig. 312.

Sean: V el potencial de los puntos A y C, V_1 el potencial de B, V_2 el potencial de D e i la corriente en AB y AC.

Los dos condensadores de capacidades x y C, en serie con la pila, han tomado cargas iguales de valor:

$$(1) \qquad x(V - V_1) = C(V_2 - V).$$

Por otra parte la diferencia de potencial entre B y A es:

$$V - V_1 = ri$$

y la diferencia de potencial entre A y D es:

$$V_2 - V = r'i,$$

o sea que:

$$\frac{V - V_1}{V_2 - V} = \frac{r}{r'}$$

y comparando esta relación con la igualdad (1) se ve que:

$$\frac{x}{C} = \frac{r'}{r}, \quad x = C\frac{r'}{r}.$$

II. — Medición por comparación con un coeficiente de inducción mutua

Se forma un circuito comprendiendo una resistencia conocida *R*, el circuito primario *P* de una bobina de inducción mutua y un manantial eléctrico, acumulador o pila (fig. 313).

Entre las extremidades de la resistencia *R* va derivado el condensador que se estudia, de capacidad *x*, intercalando un interruptor *A*.

El condensador y el secundario *S* de la bobina de inducción pueden conectarse con el balístico *B* por los pocillos de mercurio *1* y *2*.

Se opera de la manera siguiente:

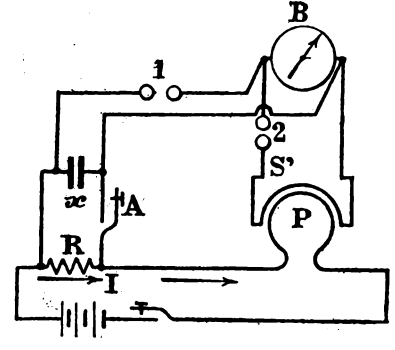


Fig. 313.

Levantados los caballeros de los pocillos *1* y *2*, se cierra el interruptor *A* y el condensador toma la carga xRI, siendo *I* la corriente que circula en el circuito; se abre ahora *A* y se colocan los caballeros en los pocillos *1* y *2*: el condensador se descarga en el balístico shuntado por la bobina *S* y se lee la elongación θ. Se tiene:

$$(1) \qquad xRI = K\theta.$$

Con el interruptor *A* abierto y quitado el caballero de los pocillos *1*, se corta bruscamente la corriente en el circuito; resulta una elongación θ′ en el balístico, que

se encuentra así en las mismas condiciones de amortiguamiento que anteriormente.

Sea M henrys el valor del coeficiente de inducción mutua de la bobina; cuando la bobina primaria está recorrida por la corriente I, el flujo a través del circuito secundario es MI, y cuando se corta el circuito este flujo se anula y se produce a través de este circuito una variación de flujo MI; resulta una cantidad de electricidad $\frac{MI}{r}$ (siendo r la resistencia del circuito secundario) que, al atravesar el balístico, provoca una elongación θ' tal que:

$$\frac{MI}{r} = K\theta'. \tag{2}$$

Dividiendo miembro a miembro las igualdades (1) y (2), se tiene:

$$\frac{xRr}{M} = \frac{\theta}{\theta'},$$

de donde:

$$x = \frac{M}{Rr}\frac{\theta}{\theta'}.$$

Si el valor de M está dado en milihenrys, el valor de x vendrá expresado en milifarads; la capacidad tendrá por valor:

$$x = \frac{1\,000\ M}{Rr} \cdot \frac{\theta'}{\theta} \text{ microfarads.}$$

Medida de un coeficiente de autoinducción. — Los métodos de medida de un coeficiente de autoinducción, o son poco precisos, o necesitan instalaciones complicadas y desde luego bastante difíciles de realizar.

No podemos, pues, aquí más que reducirnos a procedimientos bastante sencillos:

PRIMER MÉTODO. — Se hace pasar por la bobina, cuyo coeficiente de autoinducción se desea conocer, una corriente alterna de frecuencia conocida N y se

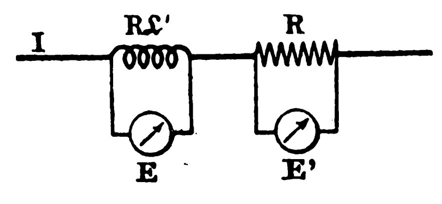


Fig. 314.

mide el valor de la corriente eficaz I que la atraviesa, así como la tensión eficaz E entre sus extremidades. Se tiene:

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + 4\,\pi^2\,N^2\,\mathcal{L}^2}},$$

siendo R la resistencia óhmica de la bobina, y se deduce:

$$\mathcal{L} = \frac{\sqrt{E^2 - R^2 I^2}}{2\,\pi\,N}\ \text{henrys.}$$

Se puede aún colocar la bobina de autoinducción en serie con una resistencia conocida R' y medir las tensiones entre las extremidades de la bobina y de la resistencia.

Se tiene entonces:

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \mathcal{L}^2\omega^2}}, \qquad \omega = 2\,\pi\,N$$

e

$$I = \frac{E'}{R'},$$

de modo que:

$$\frac{\sqrt{R^2 + \mathcal{L}^2\omega^2}}{R'} = \frac{E}{E'},$$

de donde se deduce:

$$\mathcal{L} = \frac{\sqrt{E^2 R'^2 - E'^2 R^2}}{E' \omega} \text{ henrys.}$$

Este método supone evidentemente que las corrientes son rigurosamente sinusoidales.

Segundo método. —**Comparación de dos coeficientes de autoinducción por medio del puente.**—El montaje se efectúa como lo indica la figura 315. La bobina de autoinducción va colocada en una de las ramas con una resistencia regulable r; el galvanómetro es un balístico. Se regulan las resistencias del puente de manera que el equilibrio se realice con corriente permanente, de suerte que durante la regulación se cerrará primeramente el interruptor de la pila y después el del galvanómetro.

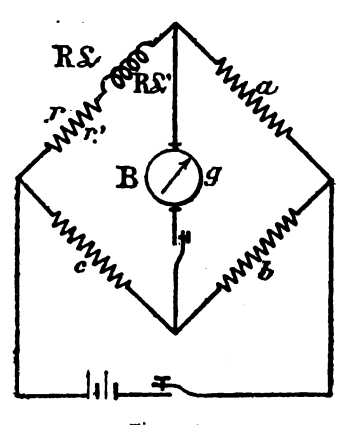


Fig. 315.

Sean a, b, c, r los valores de las resistencias del puente así obtenidas y R la resistencia de la bobina de autoinducción, se tiene:

$$(R + r)\, b = a\, c.$$

Una vez obtenido el equilibrio con los interruptores de la pila y del galvanómetro cerrados, se abre bruscamente el interruptor de la pila y se lee la elongación 0 del galvanómetro.

Siendo $\mathcal{L} i$ la corriente en la bobina de autoinducción, la variación de flujo al abrir será $\mathcal{L} i$ y la canti-

dad de electricidad que pasa por el balístico, si R es la resistencia de la bobina, es:

$$q = \frac{\mathcal{L} i}{(R + r + c) + \dfrac{(a + b)\, g}{a + b + g}} \times \frac{a + b}{a + b + g},$$

$$q = \frac{\mathcal{L} i\, (a + b)}{(R + r + c)\,(a + b + g) + (a + b)\, g}.$$

Si K es la constante del balístico, se tendrá:

$$\frac{\mathcal{L} i\, (a + b)}{(R + r + c)\,(a + b + g) + (a + b)\, g} = K\, \theta.$$

Sin cambiar las resistencias a, b, c, se reemplaza la bobina de autoinducción por una bobina patrón, de coeficiente $\mathcal{L}'$ conocido, y se establece el equilibrio del galvanómetro con ayuda de la única resistencia regulable en serie con la bobina: sea r' su valor.

Es evidente, en estas condiciones, que:

1.° $R' + r' = R + r$, R' = resistencia de la bobina patrón;

2.° La corriente en la rama de la bobina es la misma que anteriormente: i.

Si θ' es la nueva elongación del balístico, se tiene:

$$\frac{\mathcal{L}' i\, (a + b)}{(R' + r' + c)\,(a + b + g) + (a + b)\, g} = K\, \theta',$$

y puesto que $R + r = R' + r'$:

$$\frac{\mathcal{L}}{\mathcal{L}'} = \frac{\theta}{\theta'}, \qquad \mathcal{L} = \mathcal{L}' \cdot \frac{\theta}{\theta'}.$$

CAPÍTULO XV

Fotometría

La fotometría consiste en el estudio de las intensidades luminosas de los focos de luz. Los procedimientos de medida de estas intensidades se deducen de las siguientes consideraciones: si delante de una pantalla E se coloca un foco luminoso, esta pantalla recibirá del foco una cierta cantidad de luz, es decir, quedará iluminada. Consideremos dos focos S_1 y S_2, separados por una pantalla opaca de modo que las partes E_1 y E_2 de E sean iluminadas respectivamente sólo por los focos S_1 y S_2 (fig. 316). Claro está que a simple vista se puede apreciar si una de estas partes está más intensamente iluminada que la otra, o si ambas lo están igualmente. Si los dos focos colocados a una misma distancia de esta misma pantalla producen iluminaciones iguales, se dice que los dos focos tienen intensidades luminosas iguales.

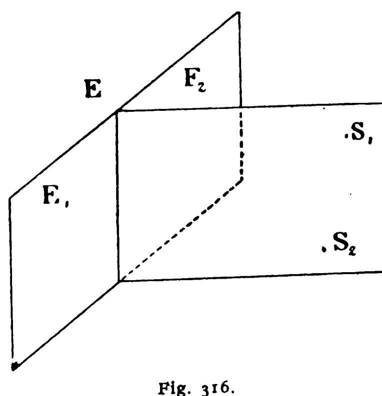


Fig. 316.

Se demuestra en Optica que si dos focos S_1 y S_2,

colocados a distancias *desiguales* d_1 y d_2 de una pantalla (fig. 317) producen sobre esta pantalla iluminaciones iguales, la relación entre las intensidades luminosas I_1, I_2 de los dos focos es igual a la relación entre los cuadrados de sus distancias a la pantalla, es decir, que:

(1) $$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

Por consiguiente, si se dispone de un aparato que permita apreciar y comprobar la igualdad de la iluminación de una pantalla por dos focos distintos, se podrá, gracias a esta proporcionalidad, determinar la relación entre sus intensidades, y si se toma como unidad la intensidad luminosa de un foco determinado, se tendrá el medio de medir las intensidades luminosas de los demás focos.

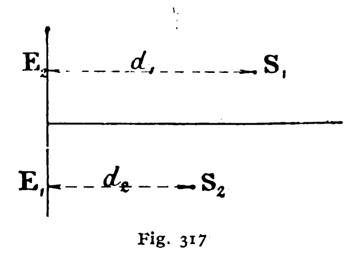


Fig. 317

Patrones o tipos de intensidad luminosa. — La unidad de intensidad luminosa es la *bujía decimal* o *pyr*, que es la intensidad luminosa de una lámina de platino de 5 mm² de superficie a la temperatura de su solidificación, observada a una gran distancia en dirección normal a su plano.

Los patrones son:

1.° El patrón *Violle*, que es la intensidad producida por una superficie plana de platino a la temperatura de su solidificación, observada según la normal. El patrón Violle vale 20 bujías;

2.° El *Carcel*, intensidad luminosa de una lám-

para Carcel, que es una lámpara de aceite de dimensiones determinadas, que funciona en condiciones también determinadas;

3.º El *Hefner*, intensidad dada por la lámpara Hefner, que es una lámpara de aceite de amilo, en condiciones determinadas de funcionamiento. Un *hefner* vale 0,885 de bujía decimal.

Fotómetros. —Los fotómetros son aparatos que sirven para medir las intensidades luminosas; se componen, en esencia, de una pantalla que se ilumina al mismo tiempo con el foco que se estudia y con otro patrón. La pantalla y los dos focos están sobre una barra graduada llamada *banco fotométrico* o, en general, *banco óptico*, y todo está dispuesto de modo que las distancias de los focos a la pantalla pueden variarse y conocerse, para cada una de las posiciones de las diferentes partes de que consta el aparato. Para hacer una medida, se busca la posición para la cual son iguales las iluminaciones de la pantalla producidas por los dos focos, y se leen sobre el banco sus distancias a la pantalla, deduciéndose la intensidad luminosa del foco estudiado aplicando la fórmula (1).

Fotómetro Bunsen. —La pantalla está formada por una hoja de papel E sobre la cual hay una mancha T de grasa, que hace que el papel sea translúcido en el punto donde se halla. Los dos focos se colocan a una y otra parte de la pantalla (fig. 318). Si la iluminación de la pantalla es mayor por el foco S_1 que por el foco S_2, la mancha observada por la cara que mira hacia S_1 se verá oscura sobre un fondo luminoso,

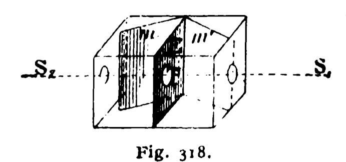


Fig. 318.

mientras que, al contrario, se verá luminosa sobre un fondo oscuro, si la iluminación producida por S_2 es mayor que la producida por S_1. Se regulan las distancias de la pantalla a los focos de modo que no se distinga la mancha, señal de que ambas iluminaciones son iguales, pudiéndose aplicar ya la fórmula (1).

Para observar fácilmente la pantalla, se disponen a una y otra parte del papel dos espejos planos inclinados *m*, *m'*, de modo que se puedan observar con un mismo ojo las dos caras del papel.

Fotómetro Lummer-Brodhun. — Este fotómetro, de uso muy generalizado, está formado por dos prismas *P*, *P'*, uno de los cuales tiene la hipotenusa esférica, en la cual hay cortado un pequeño círculo plano *g* sobre el que se aplica exactamente, con una capa de bálsamo del Canadá, la hipotenusa plana

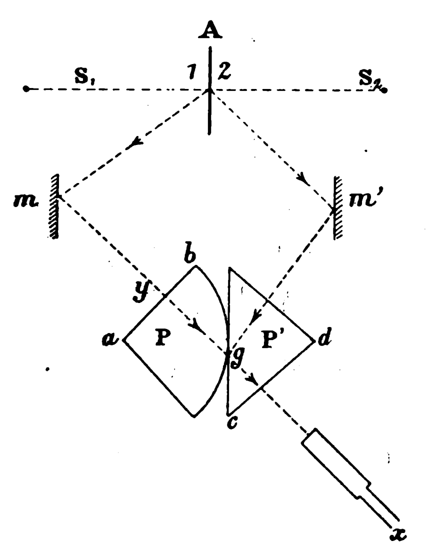


Fig. 319.

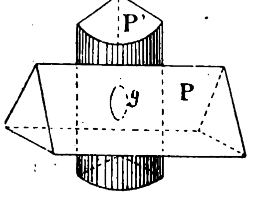


Fig. 320.

del otro prisma *P'* (figs. 319 y 320). El plano de contacto *g*, que desempeña el papel de pantalla, se dispone perpendicularmente a la línea que une S_1 con S_2.

Sobre esta línea hay una pantalla opaca *A*; los rayos emitidos por la cara 1 de esta pantalla inciden normalmente sobre la cara *ab* del prisma *P* después de reflejarse sobre el espejo plano *m*; estos rayos atraviesan, sin reflejarse ni refractarse, el sistema de los dos prismas. Mirando en la dirección *xy* se ve una superficie elíptica que es la sección del cilindro de base *g* y de eje *xy*, producida por el plano de la cara hipotenusa del prisma *P'*.

Los rayos emitidos por la cara 2 de la pantalla *A*, después de reflejarse sobre el espejo plano *m'*, penetran en el prisma *P'*, y de estos rayos, los que inciden sobre *g* atraviesan este prisma sin reflejarse, no llegando al ojo del observador colocado en *x*; en cambio, los rayos que inciden fuera de *g*, es decir, a su alrededor, sufren la reflexión total y son reflejados en la dirección *yx*, iluminando toda la región que rodea al círculo *g*; de aquí resulta que la superficie o imagen elíptica de antes queda rodeada por una segunda imagen también elíptica. Cuando las iluminaciones de las dos caras 1 y 2 son iguales, las dos imágenes se ven igualmente iluminadas, y su línea de separación desaparece por completo.

EJERCICIOS

1. — Medir la intensidad luminosa de una lámpara de incandescencia

a) El patrón es una lámpara Carcel o una lámpara Hefner. Se aplica a la lámpara estudiada *L* la tensión normal para la cual ha sido construída y se corre la pantalla hasta obtener la igualdad de iluminación por sus dos caras (figura 321), teniéndose entonces la siguiente proporción:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{l_1^2}{l_2^2}.$$

b) El patrón es una lámpara de incandescencia de intensidad conocida. En este caso hay que aplicar a la

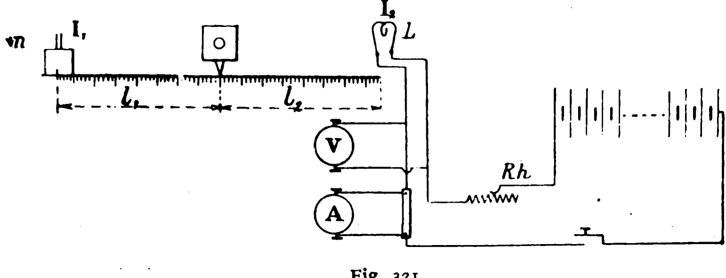


Fig. 321.

lámpara-patrón una tensión exactamente igual a la tensión para la cual se ha dado su intensidad luminosa. Con un conmutador *C* se puede emplear un solo voltímetro para

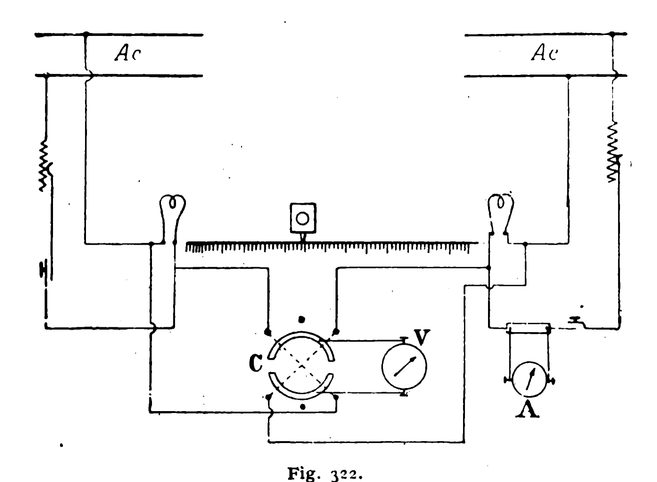


Fig. 322.

A la izquierda, lámpara-patrón; a la derecha, lámpara en estudio.

medir la tensión entre los bornes de la lámpara en estudio y entre los bornes de la lámpara-patrón. El montaje es el representado en la figura 322.

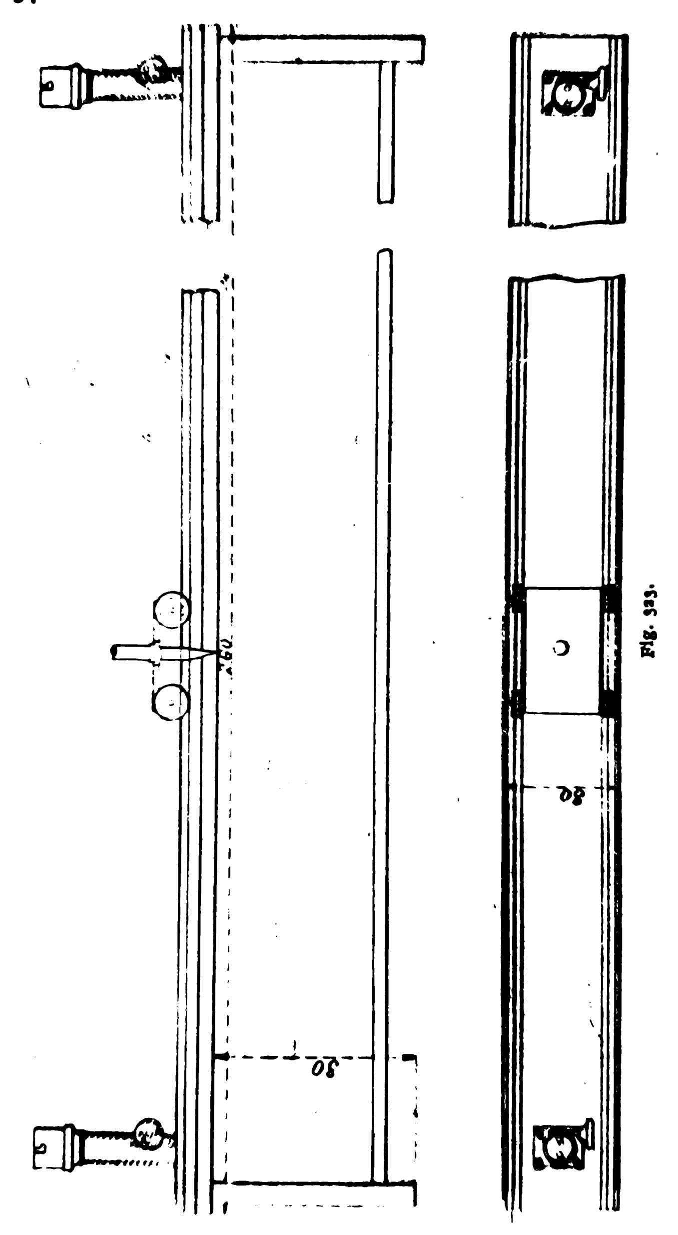


Fig. 323.

II. — Variación de la intensidad luminosa de una lámpara al variar la tensión

Se hace el mismo montaje que en el ejercicio anterior;

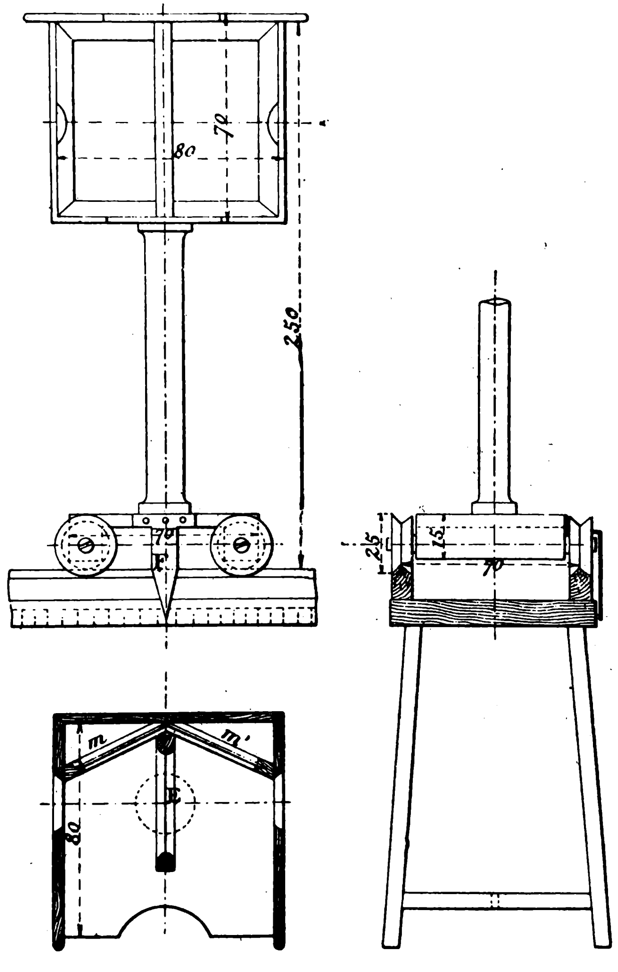


Fig. 324.

se hace variar la tensión en los bornes de la lámpara estu-

diada sin modificar la tensión en los bornes de la lámpara-patrón; se mide para cada valor de la tensión el valor de la intensidad luminosa y se traza una curva que tenga por abscisas las diferentes tensiones y por ordenadas las intensidades luminosas.

III. — Gasto específico de una lámpara

El voltímetro y el amperímetro dan la potencia *UI* en watts que gasta la lámpara, y la medida fotométrica da la intensidad luminosa, en bujías, deduciéndose fácilmente de estos datos el gasto específico, es decir, el gasto por bujía. Estudiar este gasto para diferentes tensiones y representar con una curva sus variaciones con la tensión.

Hacer estas diferentes medidas, primero con una lámpara de filamento de carbón, y después con distintas lámparas de filamento metálico.

OBSERVACIÓN. — En los esquemas de las figuras 323 y 324 se ve que es fácil construir un fotómetro. Para preparar la pantalla se aplica sobre una hoja de papel un disco de latón previamente calentado y sumergido en un baño de parafina. En caso necesario se quita el exceso de parafina mediante un papel secante y un hierro caliente.

IV. — Caso de corriente alterna

Estudiar la intensidad luminosa y el gasto específico de una lámpara alimentada bajo una tensión alterna. Repetir las mismas medidas que las hechas con la corriente continua.

CAPÍTULO XVI

Nota sobre los aparatos de dos agujas del comandante Ferrié

Con estos aparatos se puede medir una cantidad que sea función de otras dos susceptibles de ser medidas por las desviaciones de una aguja. Consideremos, por ejemplo, la medida de una resistencia R; se sabe que aplicando entre sus extremos una diferencia de potencial igual a U volts, es recorrida por una corriente I que cumple con la condición:

$$R = \frac{U}{I}.$$

R es función de dos cantidades U e I, que pueden medirse mediante las desviaciones de la aguja del galvanómetro. Supongamos, por consiguiente, que un galvanómetro sea recorrido por la corriente que atraviesa la resistencia, y que otro galvanómetro esté dispuesto entre los extremos de esta resistencia, estando evidentemente estos galvanómetros en serie y shuntados con resistencias convenientes.

Si se da sucesivamente a la tensión aplicada valores u_1, u_2, u_3... la aguja del galvanómetro correspondiente tomará las posiciones OA_1, OA_2, OA_3... (fig. 325). Para estas tensiones, la corriente en la resistencia tomará los valores i_1, i_2, i_3... y la aguja del galvanó-

metro tomará las posiciones OB_1, OB_2, OB_3... Consideremos los puntos de cruce de las agujas en las posiciones OA_1 y OB_1, OA_2 y OB_2, OA_3 y OB_3... y unámoslos

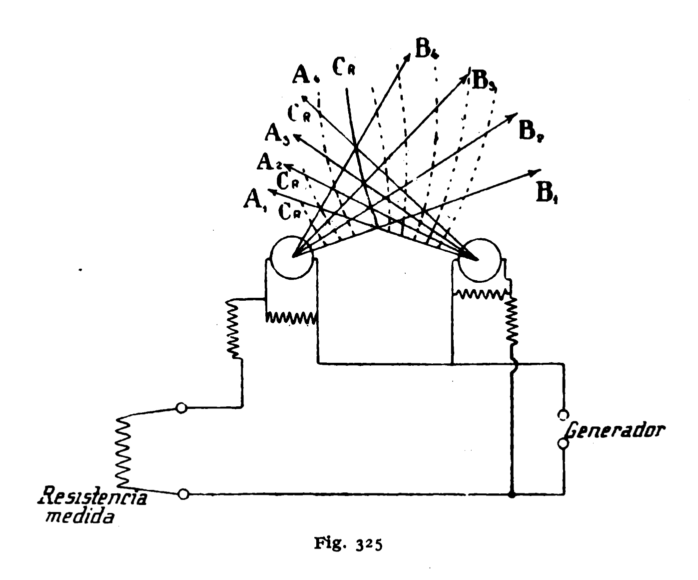


Fig. 325

con un trazo continuo, con lo cual se obtendrá una curva tal como C_R. Procediendo del mismo modo con otras resistencias R', R'', R''', se obtendrán las curvas C_R', C_R'', C_R'''... Una vez trazadas estas curvas, se comprende fácilmente que si para medir una resistencia se aplica entre los dos extremos una d. d. p. U, pasará una corriente i por estas resistencias; las agujas de los dos galvanómetros tomarán cada una una posición determinada, y el valor r de la resistencia medida será R', R'', R''', según que el punto de cruce de las dos agujas esté sobre una de las curvas C_R', C_R'', C_R'''.

La casa Carpentier ha construído aparatos fundados en este principio (fig. 326) y de tal modo que quedan

eliminadas las causas de error que siempre se presentan

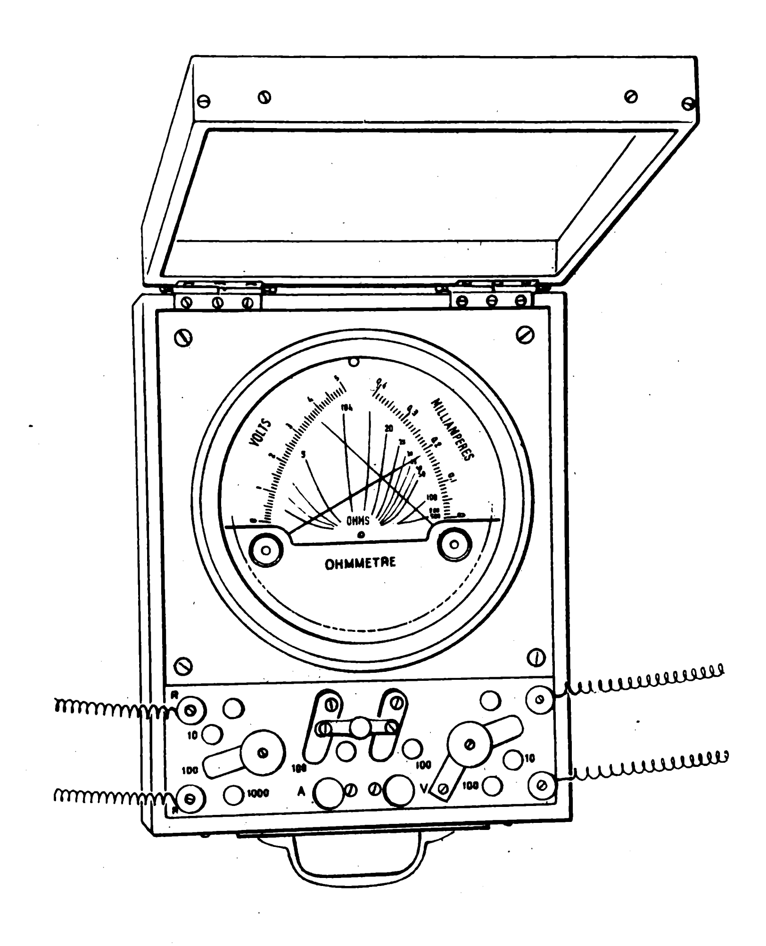


Fig. 326.

cuando se extienden los límites entre los cuales se quieren hacer las medidas.

Frecuencímetro. — Consideremos dos circuitos A_1B_1, A_2B_2 alimentados en derivación por el generador cuya frecuencia N se quiere conocer. El primero A_1B_1 tiene una resistencia óhmica R y nada de autoinduc-

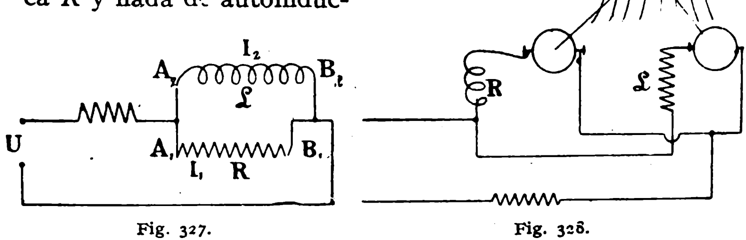


Fig. 327. Fig. 328.

ción; el segundo A_2B_2 tiene una resistencia óhmica despreciable y un coeficiente de autoinducción igual

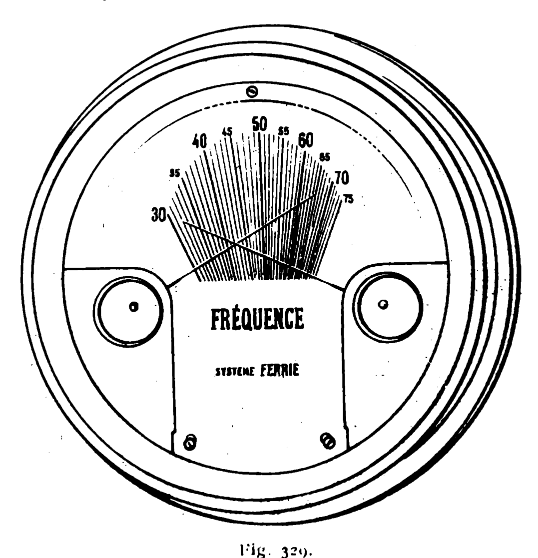


Fig. 329.

a $\mathcal{L}$ (fig. 327). En cada uno de estos circuitos hay dispuesto un amperímetro, de manera que sea reco-

rrido respectivamente por la corriente que circula por cada uno de éstos. Si U es la tensión eficaz entre los extremos de estos circuitos, las corrientes serán:

$$I_1 = \frac{U}{R} \quad \text{y} \quad I_2 = \frac{U}{\mathcal{L}\omega} = \frac{U}{2\pi N \mathcal{L}},$$

de donde:

$$I_2 = \frac{R I_1}{2\pi N \mathcal{L}} \quad \text{y} \quad N = \frac{R I_1}{2\pi \mathcal{L} I_2}.$$

Se ve en esta última igualdad, que da el valor de N, que la frecuencia N es una función de las corrientes I_1, I_2, y que por lo tanto queda determinada por el punto de cruce de las agujas de los dos amperímetros (fig. 328). Estos amperímetros son miliamperímetros térmicos (fig. 329).

ÍNDICE

CAPÍTULO PRIMERO

Patrones y aparatos de medida

Págs.

CAPÍTULO II

Medida de resistencias con el puente de Wheatstone

CAPÍTULO III

Aplicación del método del puente a la busca de tierra

CAPÍTULO IV

Medida de las resistencias de aislamiento

CAPÍTULO V

CAPÍTULO VI

Medida de las fuerzas electromotrices y de las diferencias de potencial

CAPÍTULO VII

Medida de las intensidades

CAPÍTULO VIII

Potenciómetros

CAPÍTULO IX

Medida de potencias. — Medida de energía (corriente continua)

CAPÍTULO X

Medida de las cantidades magnéticas

CAPÍTULO XI

Medidas referentes a las corrientes alternas

CAPÍTULO XII

Contadores, fasímetros y frecuencímetros para corrientes alternas

CAPÍTULO XIII

Aparatos de comparación

CAPÍTULO XIV

Medida de capacidades

CAPÍTULO XV

Fotometría

CAPÍTULO XVI

Nota sobre los aparatos de dos agujas del comandante Ferrié

TRATADO DE GALVANOTECNIA, por W. PFANHAUSER. Un vol. de 798 págs., de 25 X 16,5 cms., con 335 grabados.

MANUAL DE TELEGRAFIA ELECTRICA, *aérea, submarina y sin hilos,* por R. FERRINI y C. CANTANI. Un volumen de 382 págs., de 19 X 12,5 cms., con 138 grabados.

TRATADO DE TELEGRAFIA Y TELEFONIA. *Guía para los empleados de Telégrafos y Teléfonos,* por C. STRECKER. Un vol. de 696 págs., de 23 X 15 cms., con 535 grabados y esquemas.

MANUAL DEL INGENIERO. *Enciclopedia teórico-práctica del ingeniero y del arquitecto,* compilada y publicada por la ACADEMIA «HÜTTE» E. V., de Berlín. 2.ª ed. Cuatro volúmenes de 19 X 13 cms. TOMO I. *Matemáticas. Mecánica. Física industrial. Calor. Resistencia de materiales. Conocimiento de materiales. Metrología. Topografía.* 1464 págs., con 774 grabados. TOMO II. *Elementos de máquinas. Máquinas motrices. Bombas y compresores. Máquinas-herramienta. Elevación, transporte y almacenaje. Alumbrado. Electrotecnia.* 1560 páginas, con 1991 grabados. TOMO III. *Estática de las construcciones. Fundaciones. Obras de tierra y construcción de túneles. Hormigón armado. Construcción de edificios y fábricas. Calefacción y ventilación. Máquinas empleadas en la construcción. Obras hidráulicas. Carreteras. Urbanización. Puentes. Ferrocarriles.* 1566 páginas, con 1905 grabados. TOMO IV. *Construcción naval, automóviles y aeronaves. Minas. Agricultura. Instalaciones y máquinas auxiliares de la industria. Industrias de la alimentación y afines. Pieles y cueros. Calzado. Industrias papelera y textil. Cerámica. Vidrio. Fabricación del gas. Hornos industriales. Artes gráficas. Mecánica de precisión. Fotografía, cinetecnia y radiotecnia. Extinción de incendios.* 1598 páginas, con 1300 grabados.

FORMULARIO DEL INGENIERO. *Manual práctico para los ingenieros, mecánicos y constructores*, por E. GARUFFA. Un vol. de 704 págs., de 18,5 X 12 centímetros, con 975 grabados y 240 tablas.

COMPENDIO DE RADIOTELEFONIA. *Fundamento, construcción y manejo de una radioestación de aficionado*, por L. F. KENDALL y R. P. KOEHLER, considerablemente ampliado por F. MORAL. 3.ª ed. Un vol. de 418 págs., de 19 X 12,5 cms., con 233 gb.

MANUAL DEL OPERADOR CINEMATOGRAFICO, por J. RUTENBERG y H. STROEDECKE. Un volumen de 310 páginas, de 22,5 X 15,5 cms., con 134 gbs.

TRATADO DE MECANICA INDUSTRIAL, por PH. MOULAN, revisado y ampliado por C. GERDAY. 5.ª ed. Un vol. de 1234 págs., de 23 X 15 cms., con 1401 grabados.

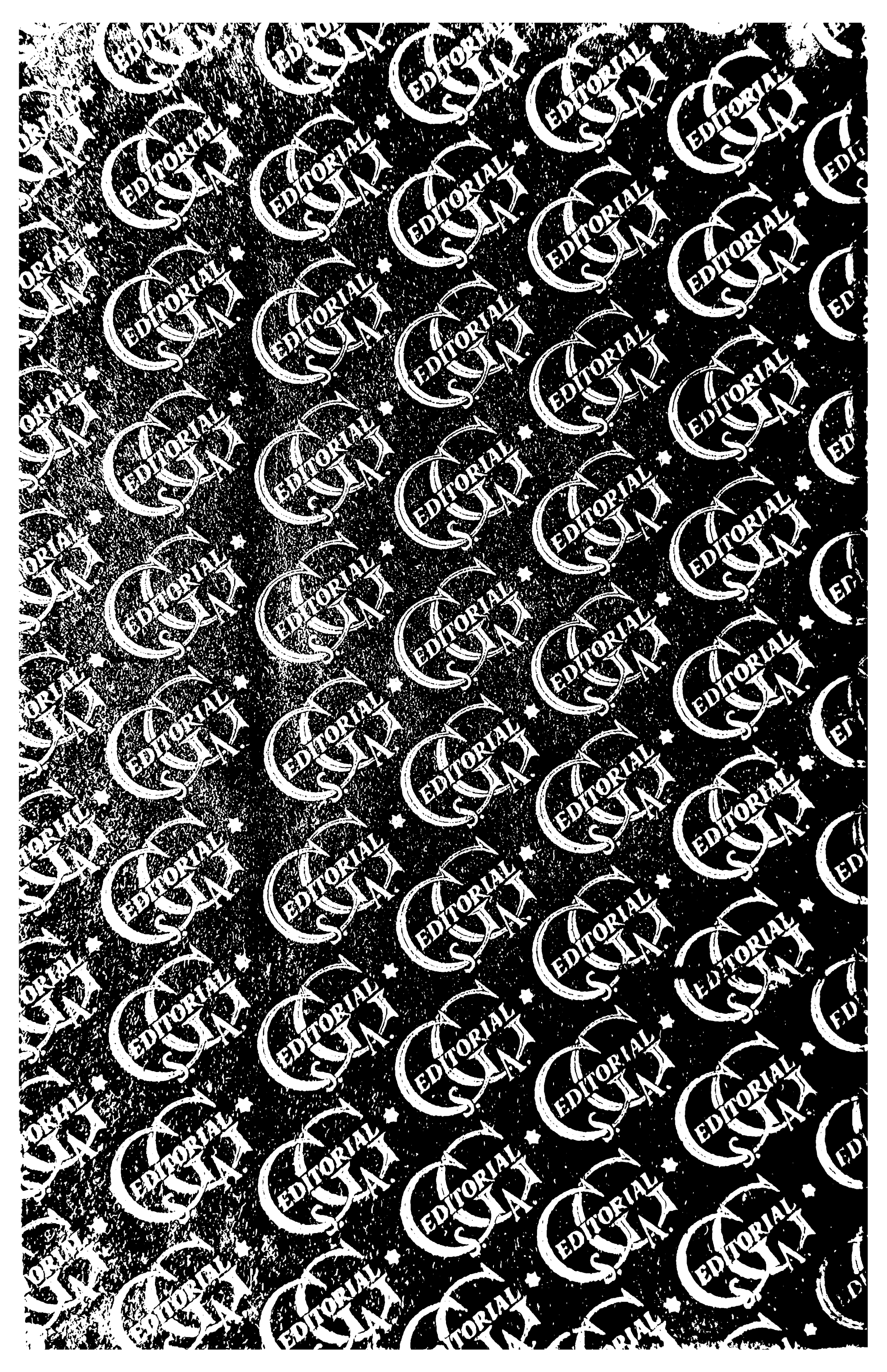
EL MOTOR DE EXPLOSION. *Motores de cuatro y de dos tiempos, motores Diesel, motores sin válvulas*, por E. PETIT. 4.ª ed., revisada por J. MOHR. Un volumen de 528 págs., de 18,5 X 12.5 cms., con 250 grabados.

GUIA DEL MECANICO PRACTICO, por W. WALKER. Un volumen de 508 págs., de 19,5 X 13 cms., con 306 grabados y 22 tablas numéricas.

TRATADO DE LA FUNDICION DEL HIERRO Y DEL ACERO, por B. OSANN. Un vol. de 798 págs., de 25 X 16,5 cms., con 706 grabados.

FISICA MODERNA. *Exposición sintética, al alcance de todos, de las últimas conquistas de la Física contemporánea*, por C. CASTELFRANCHI. 2.ª edición. Un volumen de 750 págs., de 25 X 16 cms., con 219 grabados.

TRATADO DE FISICA, por KLEIBER y KARSTEN. 10.ª ed., revisada y ampliada por H. ALT. Un volumen de 520 págs., de 22 X 16 cms., con 863 grabados y una lámina en color.


EDITORIAL
S.A.


EDITORIAL
S. A.

Pocos libros han puesto, como el de Wyss, los conocimientos esenciales de la Electrotecnia tan al alcance de cuantos han de intervenir en la construcción, el montaje o la conservación del material eléctrico. Seis ediciones rápidamente agotadas en Suiza son testimonio de la aceptación que ha tenido entre aquel público la obra de Wyss. A la claridad en la exposición y a la concienzuda selección de las materias, se añaden en esta obra los ejemplos numéricos de cálculo, desde el de una sencilla resistencia para un hornillo, una plancha o una estufa eléctrica, o de una instalación de luz con lámparas ordinarias o fluorescentes, hasta el de un motor industrial o el de un gran proyecto de calefacción.

EXTRACTO DEL INDICE

nofásicos. — Motores monofásicos con condensador. — Motorcitos de muy poca potencia. — *E. Electromotores sincrónicos trifásicos*. — Electromotores sincrónicos propiamente dichos. — Motores sincrónicos de inducción. *F. Alternomotores de colector*. — Electromotores monofásicos en serie. — Motores monofásicos de repulsión. — Motores trifásicos de colector.

CAPÍTULO VI. **Cuidado de las máquinas eléctricas Corrección de las perturbaciones de marcha. Montaje. Reparaciones.** — Protección mecánica de los electromotores. — Calentamiento de las máquinas. — Limpieza periódica. — Soportes y cojinetes. — Engrase. — Perturbaciones y defectos de funcionamiento. — Dínamos y motores de corriente continua. — Chispeo de las escobillas. — Otros defectos. — Alternomotores de colector. — Anillos colectores de corriente. — Montaje de las máquinas eléctricas. — Montaje de dos máquinas acopladas. — Reparación de las máquinas eléctricas. — Reparación de cojinetes. — Caja de la máquina. — Reparaciones del eje, del colector y de las anillas de toma de corriente. — Reparaciones en los paquetes de planchas de los núcleos. — Reparación de los devanados.

CAPÍTULO VII. **Conversión de la corriente.** — Grupos motor-generador.— Conmutatrices. — Rectificadores secos, de selenio y de óxido cuproso. — Rectificador de cátodo incandescente. — Rectificadores de vapor de mercurio. — Rectificadores con rejillas.

CAPÍTULO VIII. **Electrotermia.** — Aparatos eléctricos de cocina. — Suministro de agua caliente. — Calefacción de locales. — Calefacción por radiación y por convección. — Cálculo de la potencia necesaria. — Calefacción por contacto. — Calefacción con acumulación de calor. — Calefacción central con agua caliente. — Caso de interrumpirse la corriente en uno de los conductores en la línea trifásica. — Cálculo de las resistencias para calefacción. — Aplicaciones electrotérmicas diversas. — Producción de vapor. Hornos industriales. — Soldadura eléctrica, por resistencia y por medio del arco voltaico.

CAPÍTULO IX. **Alumbrado eléctrico.** — Nociones fundamentales de la luminotecnia. — Lámparas de incandescencia. — Montaje. — Lámparas tubulares de wolframio. — Reflectores y monturas. — Sistemas de distribución de la luz. — Cálculo del consumo de luz en una pequeña instalación.— Tubos de gases raros. — Lámparas de efluvios. — Lámparas de vapor de mercurio y de vapor de sodio. — Alumbrado mixto. — Lámparas fluorescentes. — Centelleo. — Efecto estroboscópico.

CAPÍTULO X. **Acumuladores.** — Acumuladores de plomo. — Reductores. Conexión con un reductor doble. — Acumuladores alcalinos.

CAPÍTULO XI. **Líneas de conducción.** — Densidad de corriente. — Pérdida de tensión en los conductores. — Instalaciones con tres conductores. — Instalaciones de corriente trifásica. — Distribución con tres hilos. — Distribución con cuatro hilos. — Puestas a tierra de funcionamiento y de protección.

EDITORIAL GUSTAVO GILI, S. A.

CALLE ENRIQUE GRANADOS, 45 - BARCELONA (7)

CONTADORES ELÉCTRICOS DE CORRIENTE ALTERNA

por J. DOMÉNECH CAMÓN

Jefe de Inspección y Comprobación de Contadores de la "Unión Eléctrica de Cataluña, S. A."

2.ª edición. Un volumen de 540 págs., de 20 × 13 cm., con 236 grabados. Encartonado: [redacted]esetas 41

La favorable acogida otorgada a la primera edición de esta obra, ya agotada hace tiempo, y las continuas peticiones del numeroso personal de las empresas distribuidoras de flúido eléctrico, han inducido al autor, al preparar esta segunda edición, a dar más amplitud a las explicaciones, no sólo en las cuestiones que afectan directamente a los contadores en sí, sino también en las diferentes materias que tienen relación con ellos y sin las cuales resultaría difícil poder estudiar con provecho su parte básica.

De ahí una notable ampliación del texto, en lo cual ha influído también, naturalmente, el reseñar las innovaciones y progresos ocurridos con posterioridad a la primera edición.

El autor ha logrado en esta segunda poner todas las materias, así las preparatorias como las básicas, que afectan a la medición industrial de la energía eléctrica, al alcance de todo el personal interesado, en forma tal, que resulta asequible su estudio con la posesión de un mínimo de conocimientos previos, que en lo que a matemáticas se refiere, se reduce a las reglas fundamentales.

Esta segunda edición puede considerarse como un curso completo, tanto para el personal que estudia en forma autodidáctica como, con mayor razón, para el que sigue un programa de estudios, bajo la dirección de un profesor.

Para todo aquel que haya de intervenir en la distribución de la electricidad, este manual figura entre los libros imprescindibles que hay que tener siempre a mano. Interesa especialmente a las empresas distribuidoras de flúido eléctrico la difusión del libro entre sus empleados.

Un prefacio de D. Lorenzo Pomerol, Director técnico de "Unión Eléctrica de Cataluña, S. A.", es garantía de la bondad y eficiencia del texto.

EXTRACTO DEL INDICE

PRELIMINARES: Nociones elementales de Aritmética vulgar y universal.—Nociones elementales de Trigonometría rectilínea.—Energía. Formas de la energía. Transformación de la energía.—Peso, masa e inercia de los cuerpos. Fuerza. Trabajo mecánico. Potencia.—Unidades de energía eléctrica. Unidades prácticas. Valores aproximados de las cargas absorbidas, factor de potencia y rendimiento.—Representación vectorial o cinemática de una función periódica. Composición de fuerzas concurrentes.—Fuerzas paralelas. Par de fuerzas.—Electromagnetismo. Corrientes inducidas.—Expresión de la potencia en la corriente alterna. Energía aparente, activa o vatiada y reactiva o devatiada. Potencia fluctuante.—Campos giratorios. Aplicaciones de los campos magnéticos giratorios.—Medición de la energía eléctrica. Contadores de tipo motor y pendulares.—Contadores de inducción o de campos giratorios.—Medida e integración de la energía eléctrica en los contadores de disco giratorio o rotor.—Medida industrial de la potencia. Clases de contadores de inducción.

ENERGIA ACTIVA: Contadores monofásicos.—Contadores monofásicos sin neutro. Diagrama vectorial. Funcionamiento irregular con cargas inductivas y capacitativas.—Contadores monofásicos dobles.—Contadores para cargas trifásicas equilibradas.—Contadores trifásicos para cargas no equilibradas. Funcionamiento con transformadores de medida. Posibilidad de conexiones erróneas.—Contadores trifásicos para toda clase de cargas.—Integración de la energía activa de varias alimentaciones.

ENERGIA REACTIVA: Medición de la energía reactiva.—Contadores monofásicos devatiados. Fase y neutro.—Contadores monofásicos devatiados. Dos fases.—Contadores devatiados para cargas equilibradas.—Contadores trifásicos devatiados para cargas no equilibradas. Tensiones simples.—Contadores trifásicos devatiados para cargas no equilibradas. Tensiones compuestas.—Contadores trifásicos devatiados para toda clase de cargas.—Integración de la energía reactiva de varias alimentaciones.

ENERGIA APARENTE: Medición de la energía aparente.—Contador trifásico de energía aparente, con un doble autotransformador para los circuitos de tensión.—Contador trifásico de energía aparente. Tipo RI Westinghouse. Contador "Trivector".—Integración de la energía aparente de varias alimentaciones.—Valoración de la energía reactiva. Factor reactivo. Gráficos. Intercambio de energía reactiva entre los generadores de la central y el circuito de utilización. Interconexión entre centrales en alta tensión.

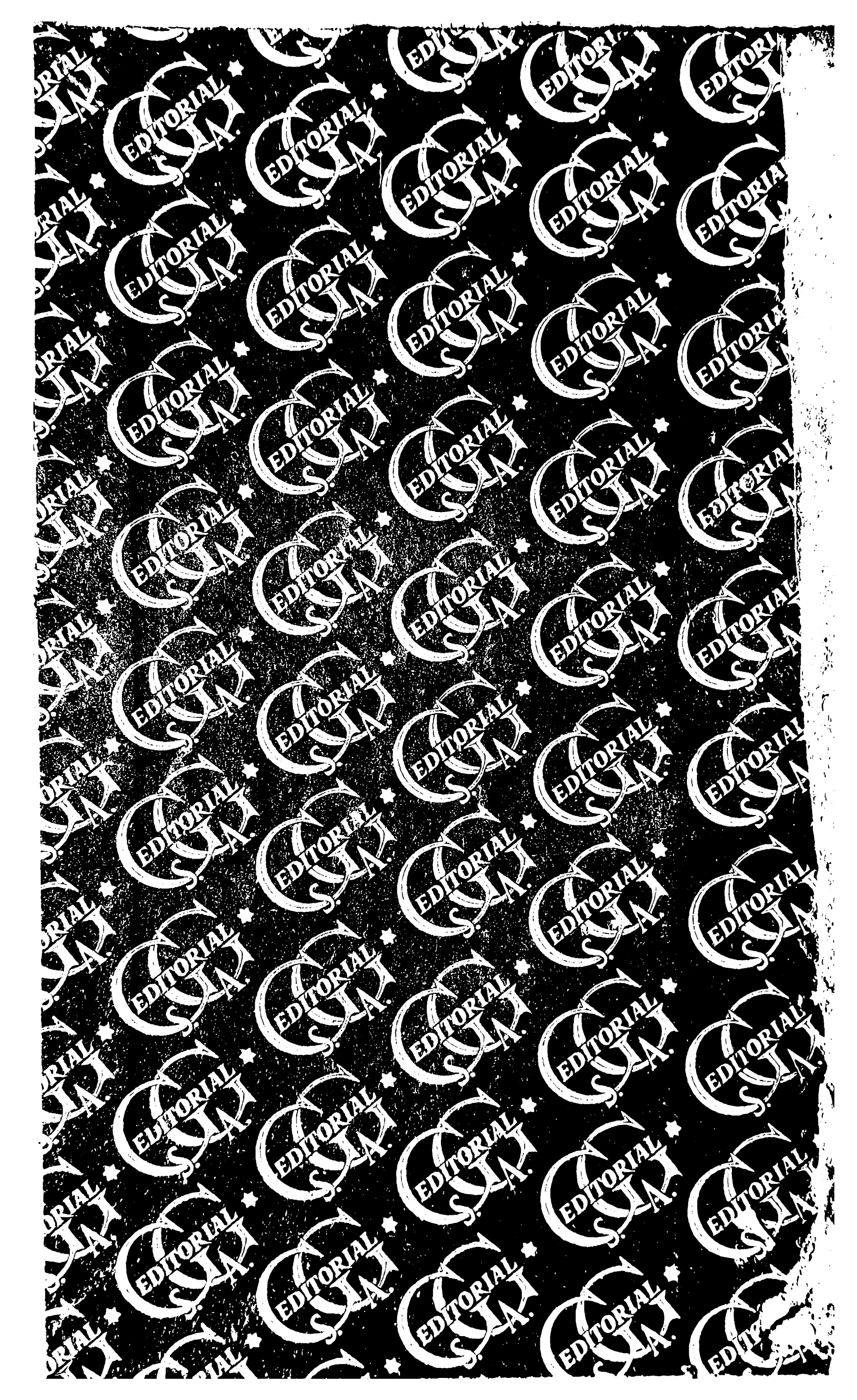
UTILIZACION, OPERACION Y MANTENIMIENTO DE LAS DIVERSAS MODALIDADES DE LOS EQUIPOS DE MEDICION: Contadores con relación al horario de consumo y a la importancia de las cargas. Contadores a cambio de tarifa. Contadores de previo pago. Contadores de exceso. Contadores de contacto. Registradores de cargas. Contadores totalizadores. Telerregulación y mando a distancia.—Condiciones generales que debe reunir un buen contador de inducción.—Laboratorios de ajuste y verificación de contadores. Tablas y curvas de errores.—Esquemas simples teóricos de contadores con transformadores.—Normas de carácter general para la colocación y cambio de contadores.—Inspección y verificación de contadores,—Dispositivos para la conexión de aparatos, sin interrumpir los suministros.—Normas básicas que ha de tener en cuenta el personal dedicado a la operación y mantenimiento de contadores.—Reglamentos oficiales de verificaciones eléctricas.

P. ROBERJOT

ELECTRICIDAD INDUSTRIAL



III. Máquinas


EDITORIAL
S.A.

ELEMENTOS DE ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

III

MÁQUINAS ELÉCTRICAS

ELEMENTOS
DE
ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

POR

P. ROBERJOT

TOMO I
GENERALIDADES

TOMO II
MEDIDAS ELÉCTRICAS INDUSTRIALES

TOMO III
MÁQUINAS ELÉCTRICAS

TOMO IV
INSTALACIONES INTERIORES
TIMBRES : TELÉFONOS : ALUMBRADO
MOTORES

TOMO V
CENTRALES Y REDES

BARCELONA
EDITORIAL GUSTAVO GILI, S. A.
Calle de Enrique Granados, 45

ELEMENTOS
DE
ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

POR

P. ROBERJOT

PROFESOR DE LA ESCUELA INDUSTRIAL DE REIMS

VERSIÓN POR

JOSÉ M.ª MANTERO

LICENCIADO EN CIENCIAS

TOMO III
MÁQUINAS ELÉCTRICAS

3.ª EDICIÓN, AUMENTADA CON ARREGLO A LA 3.ª FRANCESA



BARCELONA

EDITORIAL GUSTAVO GILI, S. A.

Calle de Enrique Granados, 45

MCMXLIV

S. A. D. A. G. — ROSELLÓN, 298. — BARCELONA

Reproducción Offset: Grafos, S. A. - Avda. José Antonio, 778, Barcelona

CAPÍTULO PRIMERO

Organización de un laboratorio de electricidad

Un laboratorio, como la sala de pruebas de una casa constructora, comprende en general los siguientes aparatos y accesorios:

1.º Un sistema de máquinas generatrices que puedan producir a diferentes tensiones, corrientes continuas y alternas mono, bi y trifásicas.

2.º Diversos circuitos que puedan alimentarse, a voluntad, por cualquiera de estas generatrices. Un grupo de líneas pasa por encima de una plataforma provista de muescas o ranuras para fijar las máquinas que se estudien, o zócalos sobre los cuales se fijan estas máquinas. Dichas líneas pueden también disponerse en losetas huecas, en el suelo, con tomas de corriente de trecho en trecho. Otro grupo de líneas va hacia las mesas donde se hacen las medidas y, en particular, la comparación de aparatos.

3.º Las máquinas que se trata de estudiar (en las fábricas estas máquinas son las que hay que probar al acabar su construcción).

Claro está que el funcionamiento y prueba de estas máquinas requiere el empleo de varios aparatos, como son reostatos, voltímetros, amperímetros, wattímetros, taxímetros, frenos, etc.

4.º Los aparatos de medida necesarios: cajas de resistencias, galvanómetros, etc.

5.º Un cuadro para estudiar los distintos montajes: instalaciones de timbres, teléfonos, luz, etc.

A continuación describimos, como ejemplo, el laboratorio que hemos montado en una Escuela práctica de Electricidad.

1.º **Máquinas generatrices.** —Los generadores de energía son:

a) Una dinamo shunt de corriente continua;

b) Un alternador que puede dar corrientes mono, bi y trifásicas.

Estas dos máquinas son movidas por un motor shunt, alimentado por la central de la ciudad, o por una dinamo accionada, a su vez, por una máquina de vapor;

c) Una batería de acumuladores de 66 elementos.

2.º **Cuadro de distribución con cinco paneles o tableros** (figs. 1 y 2). —El panel II (motor) comprende dos cortacircuitos *c*, *c*, un interruptor I_d, un reostato de arranque con acelerador R_d, y un amperímetro *A*.

El panel *I* (alternador) comprende: cuatro cortacircuitos *c*, *c*..., cuatro inversores *AA*, *BC*, *DE*, *FF*, con los cuales se pueden enviar corrientes monofásicas, bifásicas o trifásicas, sobre las líneas necesarias; un reostato de campo R_a (regulador de inducción), un amperímetro y un voltímetro térmicos, un conmutador de voltímetro C_a para poder medir la tensión mono, bi o trifásica del alternador. La excitación se toma en los bornes de la dinamo de corriente continua del grupo.

El panel III (dinamo) comprende: un inversor *ab*, *a' b'*, con el cual se puede enviar la corriente de la

dinamo a una línea cualquiera (posición *a′b′*), o cargar la batería de acumuladores (posición *ab*); dos cortacir-

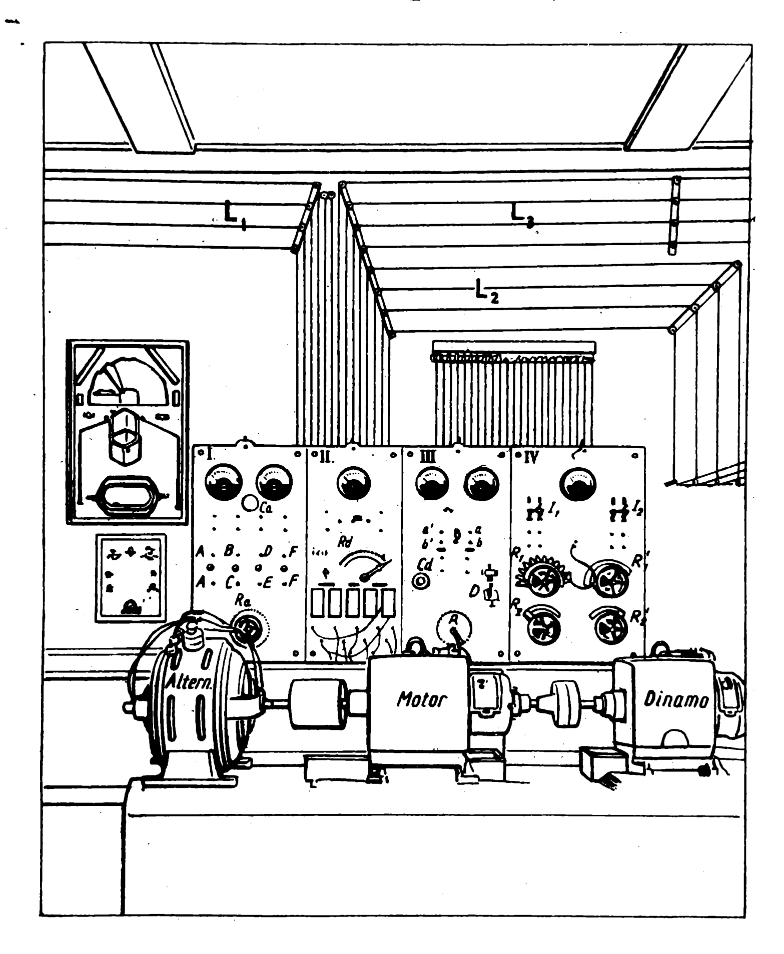


Fig. 1.

cuitos *c*, *c*, un disyuntor *D*, cuyo objeto es evitar las posibilidades de una descarga accidental de la batería en la dinamo, un regulador de inducción *R*, un con-

mutador de voltímetro C_d (para poder medir la tensión entre los bornes de la dinamo o entre los elementos de la batería utilizados por los reductores R_1 y R_2, o entre los elementos utilizados por los reductores R'_1 y R'_2), un amperímetro y un voltímetro.

El panel IV (reductores) comprende un grupo de dos reductores R_1 y R_2, para poder cargar la batería

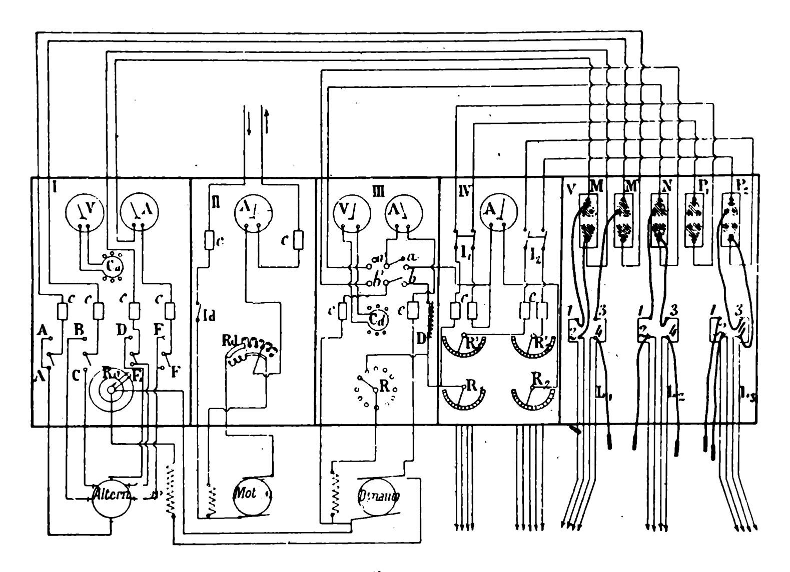


Fig. 2.

o enviar la corriente a dos líneas cualesquiera de utilización, y otro grupo de dos reductores R'_1 y R'_2 también para enviar la corriente de las baterías a las líneas; cuatro cortacircuitos, dos interruptores I_1 e I_2 el primero para los reductores R y R_2 y el segundo para los R'_1 y R'_2. Las conexiones entre los topes de estos reductores y los elementos de la batería están indicadas en el esquema de la figura 4.

El panel V (distribución) comprende cinco grupos de dos tomas de corriente M, M', N, P_1, P_2: cada una de estas diez tomas está formada por una placa de cobre con tres agujeros destinados a recibir tres clavijas, unidas con cables flexibles a los extremos de las líneas

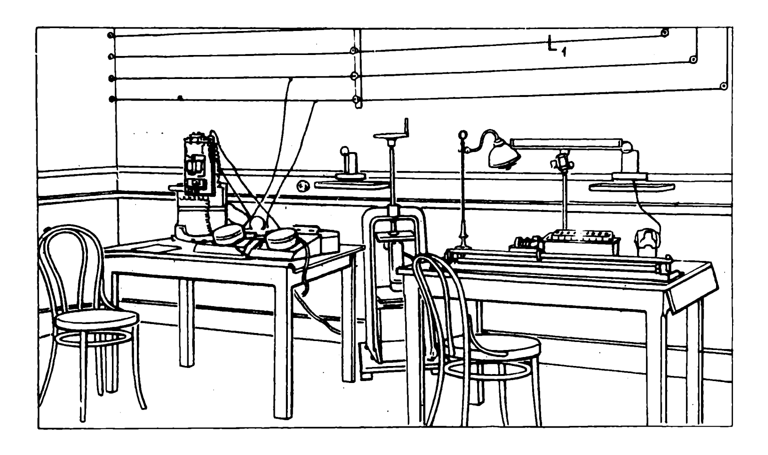


Fig. 3.

de utilización L_1, L_2, L_3. Las cuatro placas de cobre de M y M' están unidas a los cuatro bornes del alternador, las dos placas de N a las dos escobillas de la dinamo generatriz, las dos placas de P_1 a las manetas de los reductores R_1 y R_2, y por último las dos placas de P_2 a las manetas de los reductores R'_1 y R'_2.

El grupo de líneas L_1 va a las mesas de medida (figura 3), y las líneas L_2 y L_3 pasan cerca de las máquinas de prueba.

Se comprende fácilmente el funcionamiento del cuadro, observando con algún detenimiento el esquema de la figura 2; por ejemplo, si se fijan las clavijas de las líneas 1 y 3 del grupo L_2 en las tomas N, estas dos líneas quedan conectadas a las escobillas de la

dinamo, cuando el inversor del panel III está en la posición *a' b'*. Si las clavijas de las líneas 1, 2, 3 de L_1 están en las tomas de *M* y *M'*, como se ve en el esquema, estas tres líneas recibirán las tensiones trifásicas del alternador; finalmente, si las clavijas de las líneas 3 y 4 del grupo L_3 están en las tomas P_2, estas líneas quedan unidas a los elementos de la batería separados por los reductores R'_1 R'_2 cuando está cerrado el interruptor I_2.

Conexiones entre los elementos de la batería de acumuladores y los reductores. — Estas conexiones están representadas en el esquema de la figura 4. La batería de 66 elementos está formada por dos grupos: 1.º, los seis primeros elementos (desde el número 1 al número 6) están montados en serie; 2.º, los otros sesenta elementos (del número 7 al 66) también están montados en serie. Los seis primeros están unidos a los siete topes del reductor R_1 y los otros 60 están unidos de seis en seis con los topes del reductor R_2. Los topes *cero* de cada uno de estos dos reductores están unidos entre sí, y al tope *cero* de R_2 hay fijado un cordón flexible terminado en una clavija que puede introducirse en uno cualquiera de los agujeros que hay practicados en los topes de este reductor R_2

Este dispositivo permite poner entre dos líneas cualesquiera de los grupos L_1, L_2, L_3, un número de elementos que puede variar de uno en uno, desde 0 hasta 66, pudiéndose tomar estos elementos en dos puntos cualesquiera de la batería. Supongamos, por ejemplo, que se quieran descargar los elementos de 1 a 4 y de 30 a 54, o sea 28 elementos: se pondrá para ello la maneta de R_1 sobre el tope 4, la clavija de R_2 en el agujero del tope 30, y la maneta de R_2 sobre el tope 54. Se ve fácilmente, observando las conexiones, que los 28 elementos tomados están en serie entre las dos ma-

netas de R_1 y R_2 y por consiguiente entre las dos tomas de corriente P_1, cuando el interruptor I_1 del

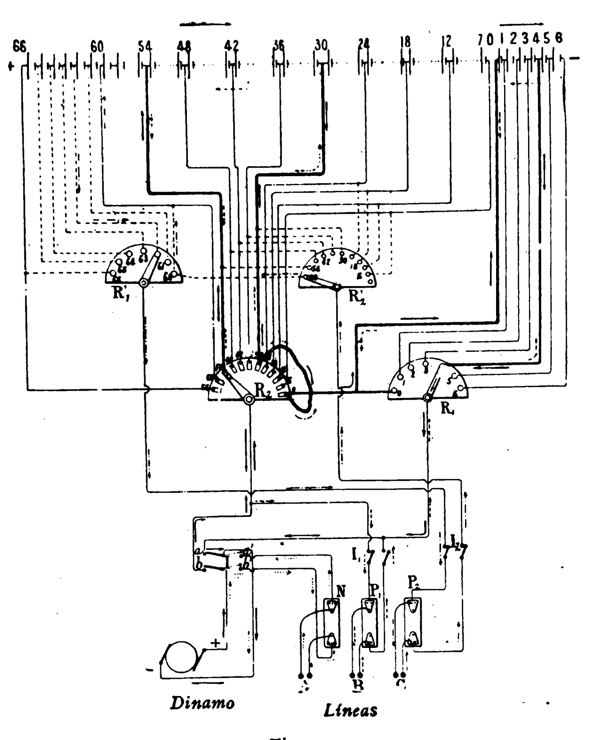


Fig. 4.

Carga de la batería: Inversor I sobre *ab.*—➤, sentido de la corriente de carga (carga de los elementos 0 a 4 y 30 a 54).

Utilización de la generatriz sobre las líneas A: I sobre *a'b'* ————> sentido de la corriente.

Descarga de la batería: I entre *ab* y *a'b'*; 1.° por los reductores R_1 y R_2: interruptor I, cerrado; ———> sentido de la corriente utilizada en las líneas *B* (descarga de los elementos 0 a 4 y 30 a 54); 2.° por los reductores R'_1 y R'_2: interruptor I_2 cerrado; —•—•—•➤ sentido de la corriente utilizada en las líneas *C* (descarga de los dos elementos 60 y 61).

panel IV está cerrado. De este modo, corriendo sobre los topes de R_2 la maneta y la clavija se pueden descargar los elementos que se quiera: en particular, si se coloca la maneta de R_1 sobre el tope 6, la maneta de

R_2 sobre el tope 66 y la clavija sobre el tope 6 de R_2, se utiliza toda la batería.

Del mismo modo se cargan los elementos que se quiera, colocando las manetas y la clavija de la manera indicada para la descarga; hecho esto, y valiéndose del conmutador C_d, se mide el voltaje entre los elementos tomados, se pone en marcha el motor, se regula con el regulador de inducción *R* el voltaje en los bornes de la dinamo de modo que sea algo superior al de los elementos que hay que cargar; se coloca el inversor del panel III sobre los topes *a*, *b*, y se cierra el interruptor del disyuntor *D*. Se regula la corriente de carga dada por el amperímetro del panel IV o del III, mediante el regulador de inducción *R*.

Los otros dos reductores R'_1 y R'_2, permiten solamente la descarga de la batería: se pueden tomar sobre dos líneas cualesquiera, 60 elementos, uno por uno (del número 66 al número 7), pero no se pueden tomar los elementos empleados.

Con esta disposición se pueden hacer trabajar todos los elementos de la batería. En un laboratorio de medidas y pruebas de máquinas, el número de elementos utilizados es muy variable, y sin la precaución tomada con la clavija móvil del reductor R_2, los elementos de los extremos (un extremo por los reductores R_1 y R_2, y el otro por los reductores R'_1 y R'_2) se utilizarían de un modo continuo, y por lo tanto se descargarían mucho antes los elementos del medio de la batería.

3.º **Máquinas de estudio o prueba.**—Las máquinas que se ensayan y que se disponen en las ranuras de la plataforma son: tres máquinas de corriente continua (shunt, serie y compound); un alternador polimórfico, que puede dar corrientes mono, bi y trifásicas; esta máquina podrá utilizarse y estudiarse como

motor sincrónico; un motor de inducción y un transformador. Sería conveniente agregar a esta serie un motor de corriente alterna con colector y un conmutador.

Estas máquinas van dispuestas sobre zócalos con ranuras, de tal modo que una cualquiera puede mover a otra cualquiera, sea por correa o por acoplamiento de sus árboles. De este modo se puede tomar para estudiar una generatriz el motor adecuado al generador de corriente que se quiera utilizar; por ejemplo, la máquina shunt o compound alimentada por la batería de acumuladores, o la dinamo del grupo generador. Es conveniente tener en cuenta la posibilidad de adaptar en el extremo del árbol de cada máquina una polea pequeña para mover un taxímetro que, durante una prueba, se fija en el zócalo de la máquina en estudio.

Los zócalos o bancos sobre que se fijan las máquinas tienen la forma representada en la figura 5. Para poder moverlos con facilidad, las bases de los zócalos están hendidas en los puntos por donde deben entrar los pernos de fijación sobre los raíles, con lo cual se puede, haciendo correr dichos zócalos a lo largo de estos raíles, poner o quitar los pernos, cuyas tuercas están evidentemente en la parte de fuera.

4.° **Aparatos empleados en los montajes y pruebas.** — *Voltímetros y amperímetros.* — Estos aparatos son del tipo Chauvin-Arnoux; los voltímetros son de varios alcances, y los amperímetros con shunts. Se montan estos aparatos sobre paneles portátiles que se colocan cerca de las máquinas que se prueban o sobre mesas: en el caso de que las operaciones que se hagan tengan principalmente por objeto el montaje, es preferible montar dichos aparatos sobre paneles

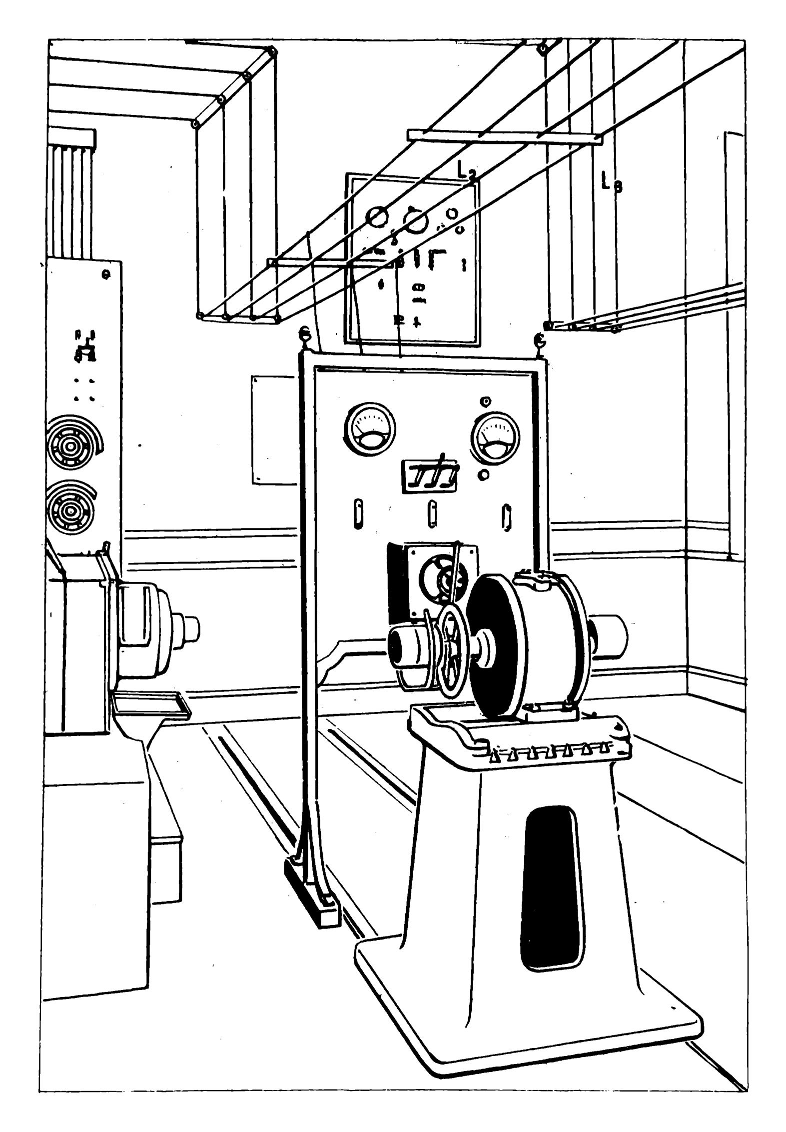


Fig. 5.

con conexiones muy bien hechas; si lo que se trata de hacer es una prueba, es mejor disponer los aparatos sobre mesas, lo cual requiere menos tiempo y menos gastos, ya que pueden utilizarse alambres y cables usados. En este último caso resulta muy cómodo fijar los voltímetros y amperímetros sobre soportes de madera inclinados, como se ve en la figura 6. En la parte horizontal de este soporte hay un conmutador con el cual se hace variar rápidamente el alcance del voltímetro (fig. 7); para el amperímetro hay dispuestas en dicha parte horizontal láminas de interruptores entre las cuales pueden tomarse los extremos de los shunts (fig. 8). Se disponen dos grupos de estas láminas unidas a dos tomas de corriente de modo que se puedan cambiar los shunts sin necesidad de cortar la corriente. Por ejemplo, al empezar una medición, como la corriente es pequeña, se coloca entre las dos láminas *M* y *N*, y por consiguiente, entre los dos bornes *B* y *B'* el shunt de 3 amperes; en cuanto la intensidad pase de 3 amperes, se introduce entre *M'* y *N'* el shunt de diez amperes y se quita el de tres, de modo que entre los bornes *B*, *B'* ha quedado colocado un nuevo shunt, sin

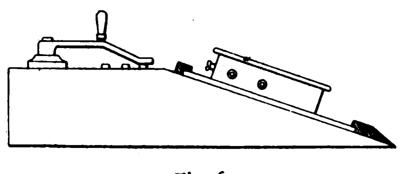


Fig. 6.

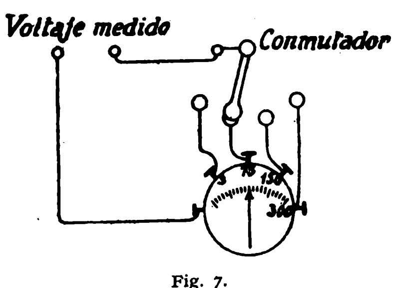


Fig. 7.

haber tenido que cortar la corriente. Se opera del mismo modo, en caso necesario, para emplear el shunt de 30 amperes dispuesto entre *M* y *N*.

Los voltímetros y amperímetros que tienen un imán deben colocarse a distancias suficientes de las máquinas en servicio, para que no estén sometidos a influencias magnéticas extrañas.

Tratándose de voltímetros y amperímetros para corrientes alternas, es conveniente compararlos con aparatos bien precisos, antes de emplearlos.

Reostatos. — Las formas de los reostatos que hay que emplear en los diversos ensayos difieren entre sí por el valor de la potencia que deben absorber, por su precisión y por el alcance de la regulación que se quiere obtener.

REOSTATOS CONSTITUÍDOS POR LÁMPARAS. — Estos reostatos son muy cómodos cuando se quiere hacer variar progresivamente la intensidad de la corriente en un circuito. El valor de sus resistencias permanece invariable mientras dura la medición; por lo tanto son muy indicados para medidas de precisión y comparación de aparatos (voltímetros, amperímetros, wattímetros, contadores). Las lámparas de incandescencia están generalmente montadas en paralelo por grupos de unas diez, con interruptores i_1, i_2, i_3; los grupos están a su vez en paralelo entre dos conductores y

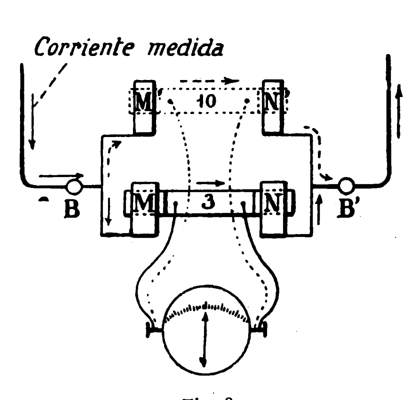


Fig. 8.

sujetos a un interruptor general *I*. Uno de los grupos está provisto de boquillas (portalámparas) con llave de modo que se pueda variar el número total de lámparas, una por una (fig. 9). Puede evitarse el empleo de las boquillas con llave, sirviéndose de las boquillas con rosca, de Edison.

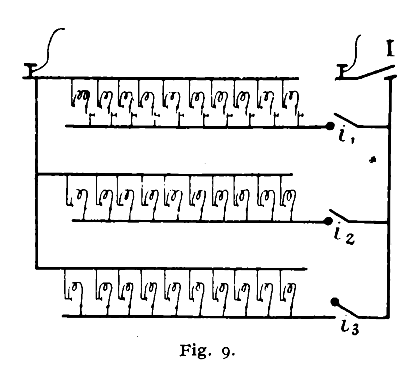


Fig. 9.

REOSTATOS CON RESISTENCIAS METÁLICAS. —Están formados por hélices de maillechort, de ferroníquel o de hierro, unidas en serie o en paralelo. El más recomendable de estos metales es el maillechort; es maleable después de recocido, inoxidable al aire salvo a temperaturas muy altas, muy tenaz y su coeficiente de temperatura (variación de la resistividad al elevarse 1° la temperatura) es muy pequeño. El ferroníquel tiene una resistividad muy grande, de 70 a 75 microhmscentímetro, y parece el más indicado para la construcción de los reostatos, pero es oxidable al aire, se vuelve frágil al cabo de algún tiempo de uso, y conserva, aun después de recocido, una rigidez que dificulta a veces su manejo y utilización.

El hierro no se emplea más que en caso de instalación provisional o cuando hay que hacer pruebas en el sitio en que se ha hecho el montaje, lejos de la fábrica y laboratorio.

Las resistencias están formadas por un alambre estirado sobre un bastidor, o por tiras de palastro. El hierro tiene el grave inconveniente de oxidarse en el

aire, de volverse frágil y de tener un coeficiente de temperatura muy elevado.

La sección del alambre que ha de constituir el reostato depende de la naturaleza del metal empleado, de la temperatura máxima a que puede llegarse y de las condiciones de refrigeración en que se encuentre.

La experiencia ha demostrado que la intensidad I de la corriente que se puede admitir está dada por la igualdad:

$$I = a\sqrt{d^3};$$

donde d es el diámetro en milímetros del alambre que forma el reostato, y a un coeficiente que depende de la naturaleza del metal, de la temperatura máxima admitida y de las condiciones de refrigeración. Según Courtois, los valores de a para el maillechort son los siguientes:

	Temperaturas	Valores de a
Reostato sin ventilar	100°	5,70
	200	8,06
	300	9,88
	400	12,10
Reostato ventilado	100	6,40
	200	9,05
	300	11,10
	400	13,60

REOSTATOS METÁLICOS SUMERGIDOS EN AGUA. — El empleo de estos reostatos está muy indicado cuando la potencia que deben absorber es considerable; entonces se encuentran en condiciones de refrigeración muy favorables, lo cual permite una mayor densidad de corriente admisible. Están formados estos reostatos por recipientes de madera o de gres llenos de agua, en la cual van sumergidas las resistencias; si la duración

del ensayo ha de ser considerable, es conveniente establecer una corriente de agua en el recipiente. Si es posible, resultará muy cómodo sumergir las resistencias en el agua de un río. En estas condiciones, el coeficiente *a* de la fórmula anterior puede alcanzar, para el hierro, el valor 50.

REOSTATOS LÍQUIDOS. — Son muy indicados estos reostatos cuando la intensidad de la corriente que debe recorrerlos es lo bastante pequeña para no elevar la temperatura del líquido de un modo apreciable; con estos reostatos se puede hacer variar de un modo continuo la resistencia intercalada en un circuito. En cambio, tienen el inconveniente de ser de manejo dificultoso, y su resistencia varía considerablemente con la temperatura, lo cual los inutiliza frecuentemente, aun tratándose de corrientes de mediana intensidad. Se pueden emplear ventajosamente cuando han de ser atravesados por una corriente, aunque sea elevada, durante un tiempo muy corto, especialmente para los arranques. Cuando el agua empieza a hervir, la resistencia permanece sensiblemente constante si se tiene cuidado de ir reemplazando el agua evaporada.

Los reostatos líquidos están formados por placas metálicas, generalmente de hierro, sumergidas en un líquido más o menos conductor; el líquido empleado es con frecuencia una solución de carbonato sódico o de clorhidrato de amonio. La resistencia varía por la separación de las placas, o por la profundidad a que se sumergen, o por la concentración del líquido.

Si la resistencia ha de ser muy grande, se emplea agua ordinaria, o una mezcla de agua destilada con glicerina pura (por ejemplo, la resistencia de pararrayos).

Frenos. — Los frenos son aparatos destinados a absorber la energía mecánica desarrollada por un motor; por lo tanto, desempeñan el mismo papel que

los reostatos, que absorben la energía bajo la forma de electricidad. Generalmente los frenos se emplean para medir el valor del par desarrollado en la polea de un motor.

El tipo de estos aparatos es el freno de Prony, formado por dos tacos de madera S, S_1 que abrazan la polea; estos tacos están unidos entre sí por varillas de hierro fileteadas y por tuercas que permiten apretarlos más o menos contra la polea (fig. 10). Uno de estos tacos tiene una prolongación, en cuyo extremo se cuelga un platillo de balanza. Este aparato está *equilibrado* de tal modo que su centro de gravedad cae en la vertical que pasa por el centro de la polea; en estas condiciones se mantiene en posición horizontal.

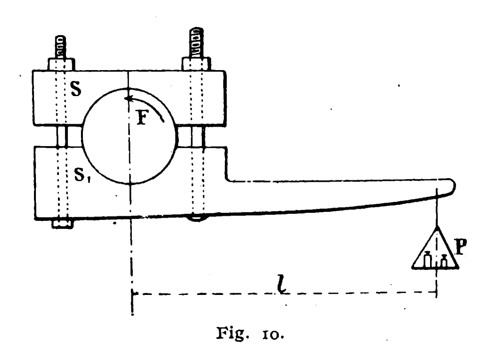


Fig. 10.

Supongamos que los tacos se hayan aflojado, y que una vez puesto el motor en marcha, se vuelven a apretar convenientemente. Como la polea gira en el sentido de la flecha F, tiende a arrastrar al freno en el mismo sentido; entonces se colocan pesas en el platillo hasta restablecer la horizontalidad del freno. En estas condiciones, el par desarrollado en la polea del motor está equilibrado por el par producido por las pesas; sea P Kg. el valor de estas pesas y l metros la longitud del brazo del freno, es decir, la distancia entre la vertical que pasa por el punto de aplicación del peso y la vertical que pasa por el centro de la polea. El par aplicado al

freno es $P \times l$ kilográmetros, y por consiguiente, el par desarrollado en la polea del motor será:

$$C = Pl \text{ kilográmetros}$$

o bien

$$C = Pl \times 9{,}81 \text{ joules (par).}$$

Se sabe que si la polea gira un ángulo ω, el trabajo producido en $C\omega$, estando medido ω por la longitud del arco de circunferencia de radio unidad comprendido entre los dos lados del ángulo (figura 11); por lo tanto, el trabajo por vuelta es $C \times 2\,\pi$, y si la velocidad del motor es de N vueltas por segundo, la potencia del motor tendrá por valor:

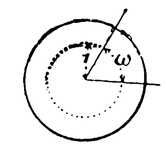


Fig. 11.

$$C \times 2\pi N$$

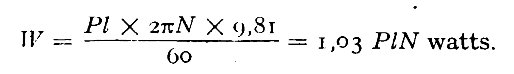
Esta potencia está medida por la potencia absorbida por el freno, o sea:

$$Pl \times 2\pi N \text{ kilográmetros por segundo}$$

o bien

$$W = Pl \times 2\pi N \times 9{,}81 \text{ watts.}$$

Si N es el número de vueltas por minuto; esta potencia tiene por expresión:



$$W = \frac{Pl \times 2\pi N \times 9{,}81}{60} = 1{,}03\ PlN \text{ watts.}$$

Esta potencia se transforma completamente en calor por el frotamiento de la polea con las zapatas del freno, de modo que la madera de estas zapatas no tarda en arder, al mismo tiempo que se produce

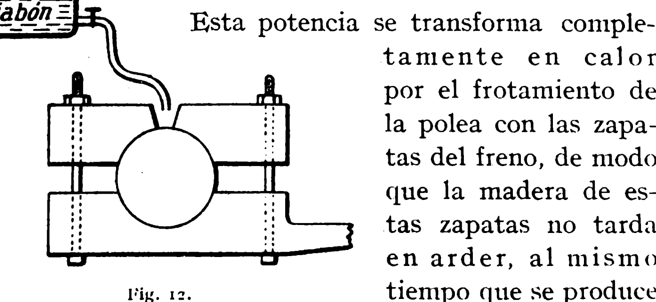


Fig. 12.

un agarramiento entre el freno y la polea, si no se toma la precaución de rociar abundantemente la polea con agua de jabón. Para ello hay una abertura en la zapata supe-

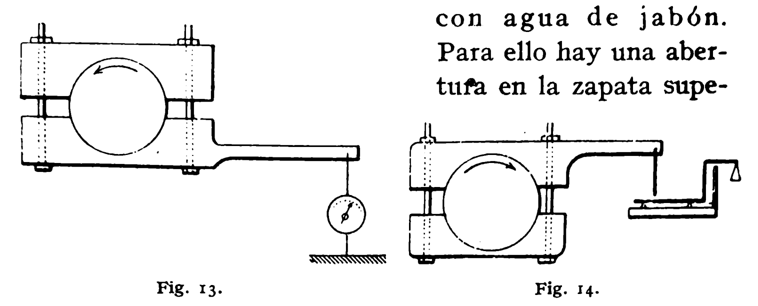


Fig. 13. Fig. 14.

rior, por la cual penetra el agua de un depósito, pasando por un tubo de caucho (fig. 12).

A veces se sustituye el peso por un dinamómetro o por una báscula (figs. 13 y 14).

Es muy importante que las zapatas aprieten, de un modo elástico, lo cual puede conseguirse colocando muelles helicoidales en las tuercas, o aprovechando la elas-

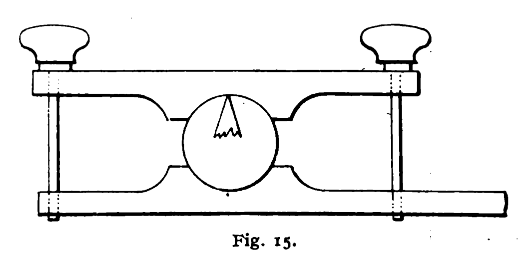


Fig. 15.

ticidad de la madera, dando a las zapatas la forma que se ve en la figura 15.

El freno se aprieta con toda comodidad empleando tuercas cubiertas con grandes empuñaduras de madera, como se ve en la figura 15.

REGULACIÓN DEL EQUILIBRIO. — Estando montado el freno sobre su brazo, se marca en la zapata superior un

trazo en el plano vertical que pasa por el centro de la polea. Entonces se coloca el freno sobre un pedazo de madera cortado en forma de cuchillo, de manera que la arista coincida con el trazo marcado anteriormente, y se fija un contrapeso en un punto conveniente para que el freno se mantenga horizontal.

DISTINTAS FORMAS DE FRENOS. — Para potencias de 1 a 25 caballos, se emplea el freno de zapatas que hemos descrito. Para potencias mayores es preferible emplear un freno cuyas zapatas estén fijadas a un collar, como se ve en la figura 16. Estas zapatas o tacos, dispuestos de modo que sus vetas sean perpendiculares a la superficie de la polea, se untan con plombagina y aceite.

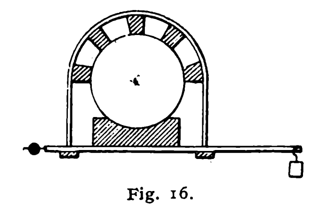


Fig. 16.

En el caso de tratarse de poca potencia y carga muy corta, es cómodo el empleo de un freno formado por una cuerda, o por una faja unida por un lado a un peso, y por el otro a un dinamómetro (fig. 17). Es evidente que de la indicación del

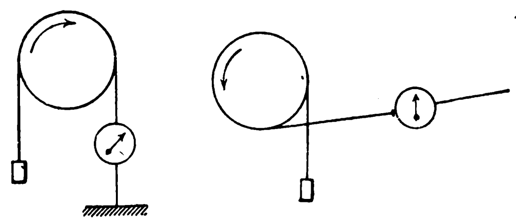


Fig. 17.

dinamómetro debe restarse el valor del peso colocado en el otro extremo.

FRENOS MAGNÉTICOS. — Un disco de cobre es movido por el motor que se ensaya, frente a los polos de un sistema inductor montado sobre cuchillos (figs. 18 y 19).

En el disco se inducen corrientes eléctricas, y el sistema inductor tiende a ser movido en el mismo sen-

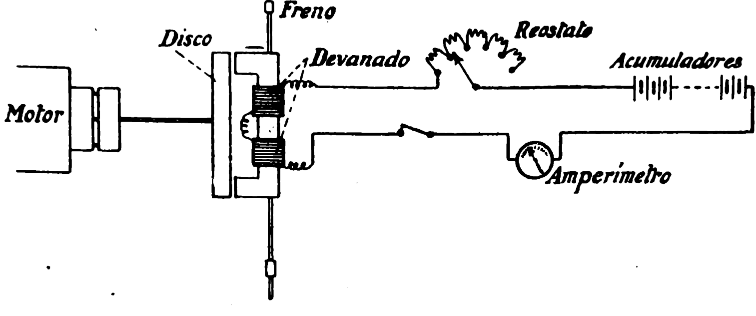


Fig. 18.

tido; se le mantiene en equilibrio mediante un par producido por un cursor móvil a lo largo de un brazo de palanca, siendo igual este par al que desarrolla el motor. La regulación del equilibrio se obtiene haciendo variar la corriente inductora en el devanado o carretes del freno.

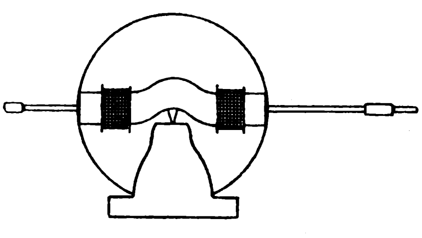


Fig. 19.

DINAMO-FRENO. —Es una dinamo cuyo sistema inductor puede oscilar alrededor de una corona de bolas, concéntrica con el árbol que lleva el inducido, y con el cual se acopla el motor que se ensaya (fig. 20).

Esta dinamo de excitación independiente va unida a un reostato, con lo cual puede variarse su carga y, por lo tanto, puede también regularse la potencia desarrollada por el motor.

En el extremo de una palanca solidaria de la armazón móvil hay un platillo para poner pesas.

Cuando el motor mueve al inducido de la dinamofreno, la armazón tiende a girar en el mismo sentido

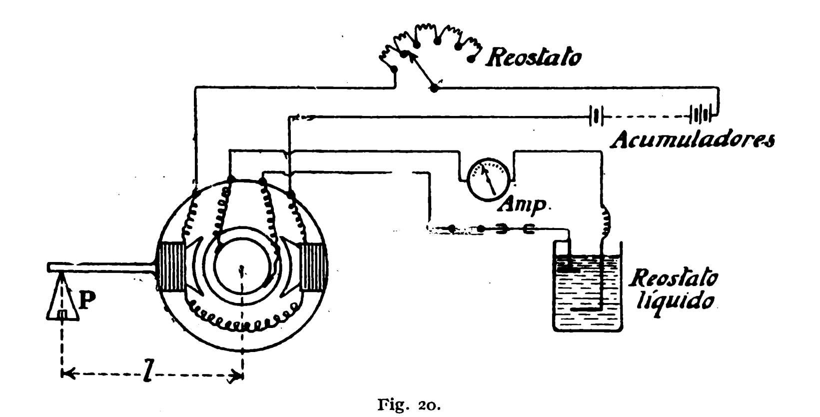


Fig. 20.

y el par necesario para mantener el equilibrio mide el par desarrollado por el motor. La regulación del equilibrio se hace con la corriente inductora.

Si la palanca tiene l metros de longitud, P Kg. es el peso colocado en el platillo, y N la velocidad del motor, en vueltas por minuto, la potencia desarrollada es:

$$W = \frac{Pl \times 2\pi N \times 9{,}81}{60} = 1{,}027\ PlN \text{ watts,}$$

o sea:

$$W = \frac{Pl \times 2\pi N}{60 \times 75} \text{ caballos de vapor.}$$

Para las grandes cargas, que necesitan una corriente de la dinamo muy intensa se utiliza un inducido de corrientes alternas; como la corriente está tomada por anillas, no hay que temer la producción de chispas en el colector.

Cuentarrevoluciones y taxímetros. — Los contadores de vueltas dan las revoluciones efectuadas por la máquina que se ensaya, durante un cierto tiempo medido con un cronómetro; en el instante en que se introduce la punta del contador en el agujero central del árbol, se pone en marcha el cronómetro, cuya aguja debía estar en el cero. A veces el contador y el cronómetro forman un solo aparato, y el cronómetro se pone en marcha y se para automáticamente al mismo tiempo que el eje del contador.

Los taxímetros dan directamente la velocidad, y al igual que los contadores llevan una punta que se introduce en el árbol de la máquina; a veces están provistos de una polea con garganta y son movidos por una correa que pasa por la garganta de otra polea fijada al árbol. En este caso, deben estar montados sobre un soporte fijado al zócalo de la máquina. Los taxímetros deben compararse frecuentemente con un contador de revoluciones.

EJERCICIOS

Todos los estudios y pruebas de generadores, de que a continuación vamos a tratar, requieren el empleo de motores para accionar los generadores. Por consiguiente, hay que empezar por ejercitarse en el montaje de un motor: reostato de arranque, regulador de inducción, comprobando que cuando se aumenta la resistencia de este último, la velocidad del motor aumenta también.

Estos montajes deben repetirse varias veces y con diferentes tipos de motores, cambiando el sentido de rotación, bien sea cambiando el sentido de la corriente en el inducido o en los inductores.

Para alimentar estos motores se utilizan los generadores de que se disponga.

Para hacer estos montajes, véase tomo I, GENERALIDADES, pág. 334.

CAPÍTULO II

Comprobación experimental de las propiedades de una dinamo de corriente continua

I. **Valor de la fuerza electromotriz inducida en una espira, en función del ángulo que forma con la línea neutra** (¹). — a) *Método de Sylvanus Thomson.* — Se construye un aparato formado por dos escobillas metálicas *A* y *B*, cada una con un borne y cortadas de modo que su sección de contacto sea menor que la de una lámina del colector, pero mayor que la del aislador que separa dos láminas consecutivas (fig. 21).

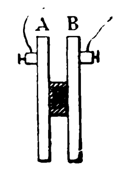
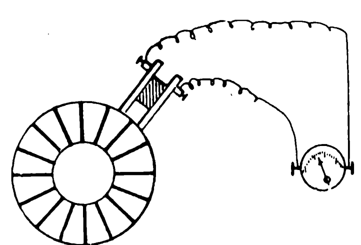


Fig. 21.

Estas dos escobillas van unidas por una barrita aisladora *K*, cuyo espesor es tal, que las escobillas tocan con dos láminas sucesivas.


Fig. 22.

Entre los dos bornes de las escobillas se conecta un voltímetro (fig. 22). Partiendo de un extremo de una línea neutra, se corren las escobillas siempre en el mismo sentido de modo que vuelvan a su primera posición

(¹) Véase tomo I, GENERALIDADES, pág. 284.

después de haber dado la vuelta completa al colector.

Para cada posición, se anota la lectura del voltímetro y se construye una curva cuyas abscisas sean

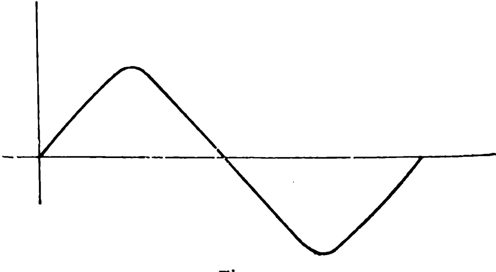


Fig. 23.

las distancias de las láminas del colector a la lámina que se toma por origen (medidas estas distancias antes del giro, por el número de láminas que hay entre ellas), y cuyas ordenadas sean las fuerzas electromotrices inducidas en las secciones comprendidas entre las láminas correspondientes, dadas por el voltímetro.

De este modo se obtiene una curva semejante a la representada en la figura 23, si la máquina es bipolar, y si es tetrapolar, la curva resultante tiene la forma indicada por la figura 24.

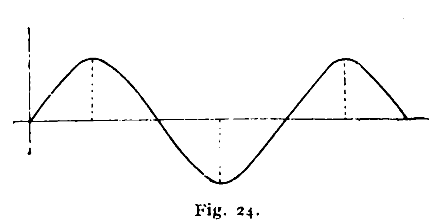


Fig. 24.

Observación. — El trazado de esta curva da el modo de determinar exactamente la posición de las líneas neutras de la máquina, que estarán dadas por las posiciones de las escobillas *A*, *B* correspondientes a los puntos en que la curva obtenida corta al eje de las abscisas.

b) *Método de Mordey.* —Las escobillas *B*, *B'* de la máquina se colocan en su posición normal, sobre las líneas neutras. Una escobilla pequeña auxiliar *A* móvil, construída como las que hemos indicado en el método anterior, puede correrse poco a poco a lo largo del colector, de modo que se vaya poniendo en contacto sucesivamente con todas las láminas (figura 25). Entre la escobilla auxiliar *A* y una cualquiera *B* de las fijas en la máquina, puede colocarse un voltímetro *V*. Se lee, para cada lámina, el valor indicado por el voltímetro y se traza la curva resultante como en el método precedente.

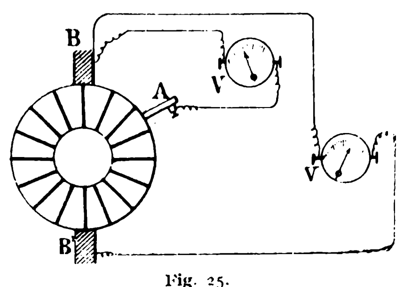


Fig. 25.

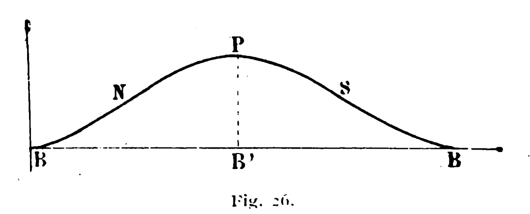


Fig. 26.

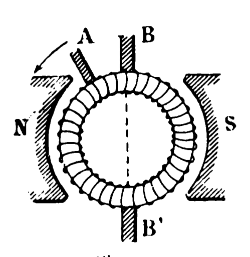


Fig. 27.

Entre dos escobillas consecutivas de igual polaridad, esta curva debe tener la forma de la figura 26; en efecto, cuando la escobilla *A* se mueve de *B* a *B'* en la dirección *BNB'* (figs. 27 y 28), la tensión entre *B* y *A* crece progresivamente, estando representada por la parte *BNP* de la curva

(figura 26); la fuerza electromotriz inducida en las espiras situadas más allá de *B'* y montadas en oposición con las espiras *BNB'*, se resta de la f. e. m. inducida en estas últimas, y la tensión entre *B* y *A* disminuye poco a poco, siguiendo la parte *PSB* de la curva.

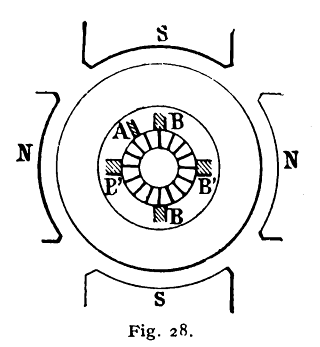


Fig. 28.

OBSERVACIÓN I. — Mientras dura el experimento, no debe variar la f. e. m. de la máquina; para comprobarlo, se coloca entre estas dos escobillas consecutivas un voltímetro *V'*, que da en cada instante el valor de esta fuerza electromotriz.

OBSERVACIÓN II. — La curva que así resulta debe ser simétrica respecto a la ordenada máxima *B'P*; una asimetría sería señal de un defecto de construcción de la máquina, ya fuera en el devanado del inducido ya en la distribución del flujo inductor.

OBSERVACIÓN III. — La aplicación de este método presenta algunas dificultades, porque a causa de las variaciones de resistencia de contacto entre la escobilla *A* y las láminas del colector (variaciones producidas por la rotación de la máquina), la aguja del voltímetro *V* oscila constantemente, dificultando muchísimo la lectura de sus indicaciones. Esta dificultad puede orillarse modificando el método para suprimir la influencia de estas variaciones.

Modificación de Swinburne. — Dispositivo de Chaumat. — Las dos escobillas consecutivas de la máquina se unen a los extremos de una resistencia considerable formada por un alambre calibrado arrollado sobre un cilindro aislador *MN* (fig. 29), a lo largo del cual puede correrse un cursor con el que puede establecerse

contacto en cualquier punto de la resistencia. Un galvanómetro G va unido a la escobilla auxiliar A y al cursor, mediante una resistencia ρ.

Colocando sucesivamente la escobilla A sobre las láminas del colector, a partir de B, se busca para

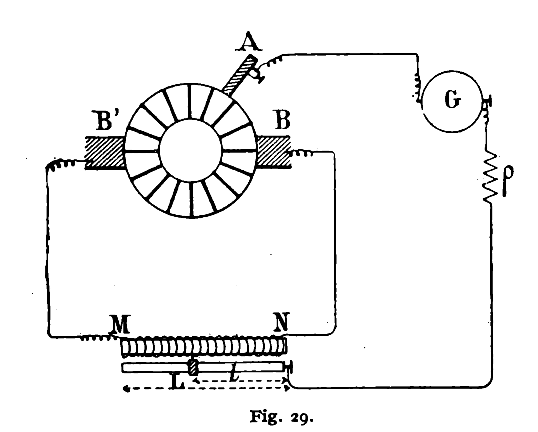


Fig. 29.

cada una de estas posiciones, la posición del cursor para la cual la aguja del galvanómetro no sufre ninguna desviación. Sea R la resistencia total del reostato MN, y r la de la parte N-cursor; para esta posición del cursor no pasa corriente alguna por la parte AG-cursor, y aplicando la ley de Kirchhoff al contorno cerrado $BNMB'$ se tiene:

$$E = R\,i;$$

siendo E la f. e. m. de la máquina (la resistencia interior de la máquina es despreciable comparada con la de MN), e i la corriente que pasa por MN. Aplicando la ley al contorno BN-cursor-GA, se tiene:

$$E' = ri;$$

donde E' es la fuerza electromotriz entre A y B.

Dividiendo E por E', se tiene:

$$\frac{E}{E'} = \frac{R}{r}$$

de donde:

$$E' = E \times \frac{r}{R}$$

y por consiguiente si L es la longitud de MN, y l la de N-cursor, se tendrá:

$$E' = E \times \frac{L}{l}.$$

Puesto que E y L son constantes, bastará leer para cada posición de la escobilla móvil la longitud l para obtener E'. Se ve que no pasando corriente alguna por el galvanómetro ni, por lo tanto, por la escobilla A, la resistencia de contacto entre la escobilla y el colector queda sin ningún efecto, pudiendo variar sin perturbar ni dificultar las mediciones.

II: **Variaciones de la fuerza electromotriz de una dinamo generadora, con la velocidad y el flujo.** — Se sabe que la fuerza electromotriz de una dinamo tiene por valor:

$$E = \frac{Nn\Phi}{10^8} \text{ volts,} \qquad (1)$$

donde N es la velocidad en vueltas por segundo, Φ el flujo a través del inducido, y n el número de espiras inducidas [1].

Esta relación (1) nos dice que la f. e. m. de la máquina es proporcional a su velocidad y al flujo.

[1] Véase primer tomo, GENERALIDADES, pág. 293.

COMPROBACIÓN.—a) *Proporcionalidad entre la f. e. m. y la velocidad.* — Se hace el montaje como indica la figura 30 de modo que la dinamo esté movida por un

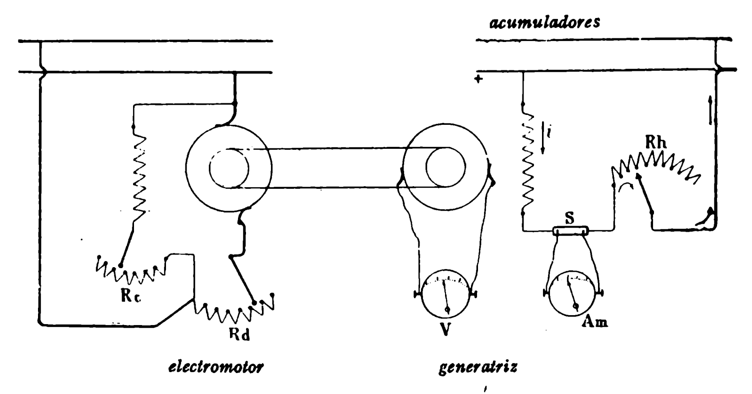


Fig. 30.

motor shunt con regulador de inducción R_c; la dinamo tiene excitación separada, estando dada la corriente i de excitación (cuyo valor se mide con un amperímetro Am), por una batería de acumuladores, y se mantiene constante por medio de un reostato Rh, si es preciso. En estas condiciones, el flujo Φ es constante. El voltímetro V indica la f. e. m. de la máquina.

Se puede variar la velocidad del motor, y por consiguiente la de la dinamo, por medio del reostato de campo o regulador de inducción R_c.

Para cada velocidad hay que leer:

1.º el número de vueltas que da la máquina por minuto;

2.º la fuerza electromotriz.

Hay que asegurarse de que la corriente de excitación i permanece siempre invariable.

Los resultados obtenidos se anotan en una tabla como la siguiente:

$i =$

NÚMERO de vueltas por minuto N	FUERZA ELECTROMOTRIZ E			CONSTANTE
	Lecturas	Sensibilidades	Volts.	$K = \frac{E}{N}$

OBSERVACIÓN. — La proporcionalidad entre la fuerza electromotriz y la velocidad (si el flujo inductor es invariable) puede utilizarse para medir la velocidad de una máquina; basta para ello mover una magneto pequeña mediante un cordón que pasa por el árbol o la polea de la máquina. Un voltímetro, derivado entre sus bornes, da la velocidad de la máquina, si se ha determinado de antemano (por comparación con un taxímetro o con un contador de revoluciones) la relación constante entre la velocidad de la máquina y la fuerza electromotriz desarrollada por la magneto.

b) *Proporcionalidad entre la f. e. m. y el flujo.* — El flujo a través del inducido es proporcional a la inducción en el entrehierro, por lo cual bastará medir la inducción en el entrehierro para una excitación dada, y la f. e. m. de la máquina.

Una vez medida la inducción en el entrehierro para un determinado valor de la inducción, se hace girar la máquina a una cierta velocidad y se mide con el voltímetro su fuerza electromotriz. Se repite la operación para distintos valores de la corriente de excitación, pero siempre a la misma velocidad. Siempre debe resultar, entre la f. e. m. y la inducción, una relación constante. El montaje es el indicado en la figura 31.

Un carrete plano de n espiras, cada una de las cua-

les tiene una superficie *s*, unido a un alambre, se introduce en el entrehierro de la máquina; los extre-

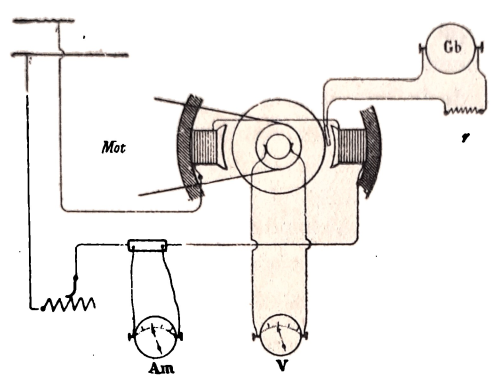


Fig. 31.

mos del carrete van unidos a un galvanómetro balístico *Gb*, a través de una resistencia *r*.

Una vez tomado el valor i de la corriente de excitación, se saca de pronto el carrete del entrehierro y se lee la elongación θ de la aguja del galvanómetro. La inducción $\mathcal{B}$ en el entrehierro sabemos que está dada por la relación:

$$\frac{\mathcal{B} s n}{r + \rho + g} = K\theta,$$

de donde:

$$\mathcal{B} = \frac{K(\rho + r + g)}{s n} \times \theta;$$

siendo ρ la resistencia del carrete, g la del galvanómetro, y K la constante del galvanómetro. Pero como durante las mediciones efectuadas para distintos valores de i, la cantidad $\frac{K(\rho + r + g)}{s n}$ permanece cons-

tante, podremos llamarle K', y tendremos:

$$\mathcal{B} = K' \theta,$$

es decir, que $\mathcal{B}$ es proporcional a θ, por lo cual es inútil conocer el valor de K', bastando comprobar que la f. e. m. de la máquina es proporcional a θ.

Los resultados obtenidos se resumen en una tabla como la siguiente:

Velocidad: $N =$

CORRIENTE de excitación i	ELONGACIÓN máxima del galvanómetro θ	F. E. M. de la máquina, E	RELACIÓN $\frac{E}{\theta}$

La relación $\frac{E}{\theta}$ debe tener siempre el mismo valor, cualquiera que sea la corriente i.

OBSERVACIÓN. — Se podría hacer variar el flujo por medio de shunts magnéticos, disponiendo entre las piezas polares de la máquina barras de hierro de forma conveniente y de secciones distintas. Para una misma corriente de excitación y una velocidad igual, hay que comprobar que la f. e. m. de la máquina es menor que cuando una parte del flujo no se ha derivado por el shunt magnético,

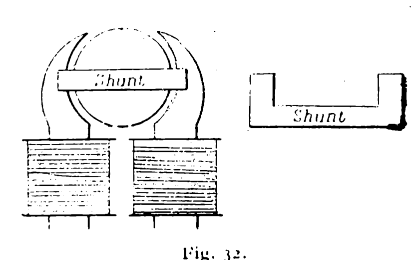


Fig. 32.

y que es tanto menor cuanto mayor es esta sección (figura 32).

III. **Variación de la f. e. m. con el desvío de las escobillas.** — La f. e. m. disminuye cuando aumenta el desvío de las escobillas ([1]) de la máquina (excitada y accionada como dijimos en la página 26). Al empezar la operación están las escobillas sobre la línea neutra, y después se van corriendo de modo que vayan aumentando los ángulos de desvío de las mismas. A medida que el desvío aumenta, la f. e. m. debe disminuir, siendo nula cuando el desvío es de 90° en el caso de una máquina bipolar, y de $\frac{90}{p}$ si la máquina tiene $2\,p$ polos.

IV. **Variación del ángulo de desvío de las escobillas.** — 1.° *Con la intensidad de la corriente producida por la máquina.* — El ángulo de desvío debe aumentar al mismo tiempo que la corriente producida por la máquina ([2]). Estando las escobillas sobre la línea neutra, se hace que la máquina dé una corriente cada vez más intensa, para lo cual basta cerrar las escobillas sobre un reostato líquido en el que se van sumergiendo cada vez más las placas. De este modo se llega a un valor de la corriente, para el cual se producen chispas; entonces se mantiene constante la intensidad de la corriente, y desviando poco a poco las escobillas antes de la línea neutra, se obtendrá una posición para la cual cesarán las chispas. El esquema del montaje es el representado en la figura 33.

2.° *Con la corriente de excitación.* — El desvío de las escobillas debe aumentar al disminuir la corriente

([1]) Véase tomo I, pág. 305.
([2]) Véase tomo I, pág. 306.

de excitación [1]. Se aplica entre los dos bornes del circuito de excitación el voltaje necesario para que pase la corriente normal i; se regula el reostato líquido de modo que la máquina produzca una corriente bastante elevada I, y se busca la posición de las escobillas para la cual se verifica la conmutación sin chispas.

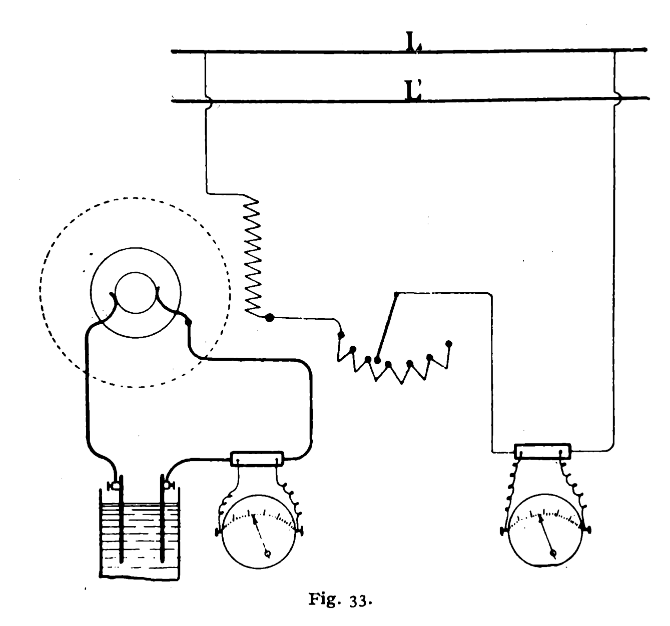


Fig. 33.

Entonces se disminuye bastante la corriente de excitación por medio de un reostato muy resistente, o reduciendo el voltaje entre las dos líneas L y L'; acercando las placas del reostato líquido para obtener aproximadamente la misma corriente que antes, se ve que aparecen chispas, y para suprimirlas, o cuando menos atenuarlas, habrá que aumentar el desvío de las escobillas. El montaje es el indicado en la figura 33.

[1] Véase tomo I, pág. 306.

V. **Reacción del inducido.** — a) *Medida de la caída de tensión.* — 1.º Se mide la resistencia del inducido de la dinamo ([1]), y sea r su valor;

2.º Estando montada la máquina con excitación independiente, se hace pasar por el circuito inductor una corriente i, y se hace que la máquina produzca una corriente I en un circuito exterior, por ejemplo en un reostato líquido; se regula el desvío de las escobillas y se mide, con un voltímetro derivado entre éstas, la diferencia de potencial u, midiendo al mismo tiempo la velocidad N en vueltas por minuto;

3.º Se hace girar la máquina de vacío con la misma velocidad de N vueltas por minuto, con la misma corriente de excitación i y con igual desvío de las escobillas que antes, leyendo en el voltímetro la fuerza electromotriz E de la máquina.

Con estos datos se comprueba que:

$$u < E - r\,I;$$

la caída de tensión debida a la reacción del inducido tiene por valor:

$$\varepsilon = E - u - r\,I.$$

b) *La reacción del inducido aumenta al aumentar la corriente producida por la máquina.* — Se repiten las mismas medidas que anteriormente, conservando los valores para i y N y el mismo desvío de las escobillas, variando únicamente el valor de la corriente producida. Hay que comprobar que la caída de tensión debida a la reacción del inducido aumenta al mismo tiempo que la corriente.

([1]) Véase tomo II, MEDIDAS ELÉCTRICAS INDUSTRIALES.

Los datos que se obtengan se resumen en un cuadro como el siguiente:

$N =$, $r =$, $i =$, $ri =$

CORRIENTE PRODUCIDA I	F. E. M. E	D. D. P. u	CAÍDA DE TENSIÓN debida a la reacción del inducido $\varepsilon = E - u - rI$

Se construye una curva cuyas abscisas sean los valores de I, y cuyas ordenadas sean los valores correspondientes de ε.

c) *La reacción del inducido es tanto mayor cuanto menor es la corriente de excitación.* — Se repiten las mismas operaciones que anteriormente, manteniendo constantes: la corriente producida, la velocidad y el desvío de las escobillas.

Se hace disminuir poco a poco la corriente de excitación y se comprueba si la caída de tensión debida a la reacción del inducido va aumentando. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla siguiente:

$N =$, $I =$, $r =$

CORRIENTE de excitación	F. E. M. E	D. D. P. u	CAÍDA DE TENSIÓN debida a la reacción del inducido $\varepsilon = E - u - rI$

Se traza una nueva curva que tenga por abscisas los valores de i y por ordenadas los correspondientes de ε.

d) *La reacción del inducido es tanto más grande cuanto mayor es el desvío de las escobillas.* — Se procede como en los casos anteriores, manteniendo constantes: la corriente producida por la máquina, la corriente de excitación y la velocidad, variando dentro de los límites posibles el ángulo de desvío de las escobillas. Hay que comprobar que la reacción del inducido aumenta a medida que aumenta este ángulo. Los resultados se resumen en un cuadro como el siguiente:

$r =$, $i =$, $I =$, $N =$

NÚM.° DE LÁMINAS del colector entre la línea neutra y las escobillas: n	F. E. M. E	D. D. P. u	$\varepsilon = E - u - rI$

Se traza la curva cuyas abscisas sean los diferentes valores de n, y las ordenadas los valores correspondientes de ε.

Regulación de la conmutación de una máquina. — Es muy importante asegurarse de la buena conmutación en carga de una máquina recién construída. Para ello se la hace funcionar en condiciones desfavorables; si no produce chispas en las escobillas se puede asegurar que en marcha normal se efectuará bien la conmutación; en caso contrario, se intenta la desapa-

rición de las chispas, mediante una regulación conveniente.

Para poner la máquina en condiciones desfavorables, se la cierra en cortocircuito y se le da muy poca excitación para que produzca su corriente máxima. Si produce chispas se procura que desaparezcan cambiando las escobillas; si se cree que las chispas obedecen a una tensión excesiva en las láminas, se experimen-

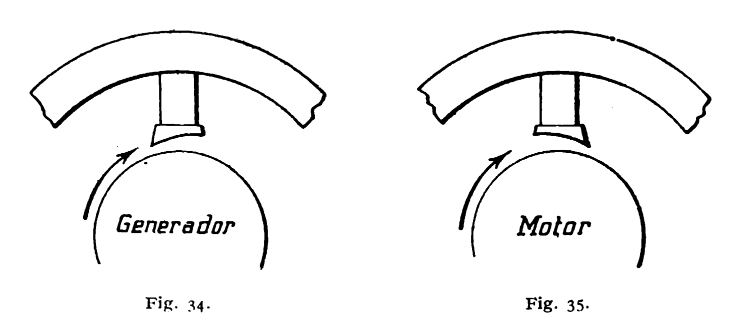


Fig. 34. Fig. 35.

tan escobillas más duras y, por lo tanto, más resistentes; si se supone que provienen de demasiada densidad de corriente, se ponen escobillas menos resistentes o de mayor sección. Se puede mejorar la conmutación, descentrando el entrehierro, para lo cual basta disminuir el espesor de las piezas polares por los vértices de salida (fig. 34).

Al contrario, en el caso de motores, es preciso disminuir el espesor de los vértices de entrada de las piezas polares (fig. 35).

Si la máquina tiene dos polos auxiliares de conmutación, se empieza por shuntar los circuitos mediante un reostato, aumentando poco a poco la resistencia hasta que se obtiene una marcha sin chispas para la corriente máxima (fig. 36).

La máquina está bien calculada cuando se con-

sigue este resultado estando el reostato completamente fuera de circuito; al contrario, si no se tiene una conmutación buena más que shuntando los circuitos de los polos auxiliares, se mide la resistencia del shunt y se coloca para siempre una tira de maillechort que tenga esta resistencia, entre los extremos de estos circuitos *s* (hay que asegurarse previamente de que los devanados de los polos auxiliares están conectados en buen sentido) (figura 37).

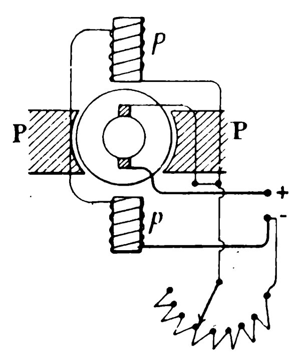


Fig. 36.
P, P, polos principales.
p, *p*, polos auxiliares.

Si a pesar de la supresión completa del reostato, siguen las chispas, hay que aumentar, para un mismo valor de la corriente producida, el flujo producido por los polos auxiliares; este resultado podrá conseguirse disponiendo placas bajo estos polos para acercarlos al inducido.

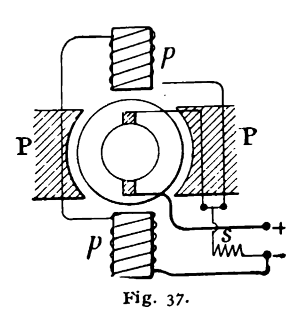


Fig. 37.

Continuando las regulaciones con la buena elección de las escobillas, se pueden mejorar mucho las condiciones de conmutación. Si a pesar de todos estos intentos siguen las chispas, hay que introducir mayores modificaciones en la máquina, llegando hasta los devanados.

Observación. — Es de todo punto necesario comprobar si los polos principales y los auxiliares están bien colocados unos respecto a otros. Si la máquina es generatriz, cada polo auxiliar debe *preceder* a un polo

principal de igual polaridad, tomado en el sentido de rotación de la máquina (fig. 38).

Si la máquina gira como motor, cada polo auxiliar debe *seguir* al principal de la misma polaridad (fig. 39).

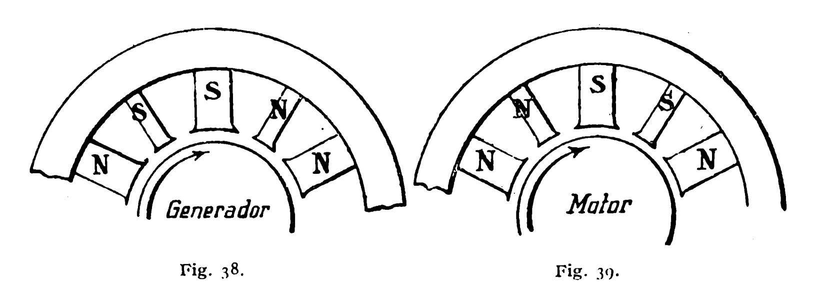


Fig. 38. Fig. 39.

Se determinan fácilmente las polaridades por medio de una aguja imanada u observando el sentido de los devanados y aplicando la regla del sacacorchos.

Las escobillas deben estar exactamente sobre las líneas neutras determinadas experimentalmente como vimos en la página 24, y deben tocar sobre las dos láminas, entre las cuales da el mínimo de desviación un voltímetro poco sensible.

EJERCICIOS

I. Efectuar las comprobaciones experimentales de que se ha tratado en este capítulo, con una máquina shunt o con una dinamo serie.

Si se emplea la primera no hay inconveniente en someter el circuito inductor a una tensión del mismo orden de magnitud que la que da normalmente la máquina generatriz o aquella con que debe funcionar como motor. Si se utiliza una máquina serie, los inductores deben alimentarse a poca tensión con un generador que pueda dar la corriente tomada o producida normalmente por la máquina.

II. Hacer que la corriente de una máquina shunt pase por un circuito de resistencia variable, y regular el reostato de campo de modo que la tensión permanezca constante para todos los valores de la corriente producida.

III. El mismo ejercicio anterior con una máquina compound.

IV. Acoplar en paralelo dos máquinas shunt. Se hace el montaje del modo indicado en el tomo I (pág. 281).

En primer lugar se hace pasar la corriente de una de las máquinas por un circuito exterior (reostato de lámparas o reostato líquido), haciendo aumentar poco a poco la carga, pero manteniendo constante la tensión. Después se pone la segunda máquina en paralelo con la primera y se reparte igualmente la carga entre las dos máquinas, pasando después toda la carga a la segunda máquina.

Si sólo se dispone de una máquina shunt y de una compound, bastará poner en cortocircuito el devanado serie de esta última.

V. Alimentar un circuito (reostato de lámparas) con una máquina serie.

Se hace variar la resistencia de este circuito y que permanezca constante la tensión entre las escobillas mediante un regulador de inducción.

VI. Acoplar en serie una máquina shunt con una máquina serie.

La máquina serie se emplea como elevador de tensión, para aumentar convenientemente la tensión de la máquina shunt. Supongamos que se disponga de una batería de acumuladores de 66 elementos, y para la carga, de un generador que dé, para el régimen de carga de la batería, una tensión entre sus escobillas de 150 volts; para llegar a la tensión necesaria para la carga completa, o sean $66 \times 2{,}5 = 165$ volts aproximadamente, se pone la dinamo serie en serie con la dinamo shunt. Se regula la velocidad y el flujo inductor de la máquina serie de modo que se mantenga constante la corriente de carga, haciendo crecer poco a poco la tensión elevada (fig. 40).

VII. Alimentar el circuito con una máquina com-

pound. — Se monta el regulador de inducción en serie con la excitación shunt, comprobándose que para una determinada posición de la maneta de este reostato la tensión

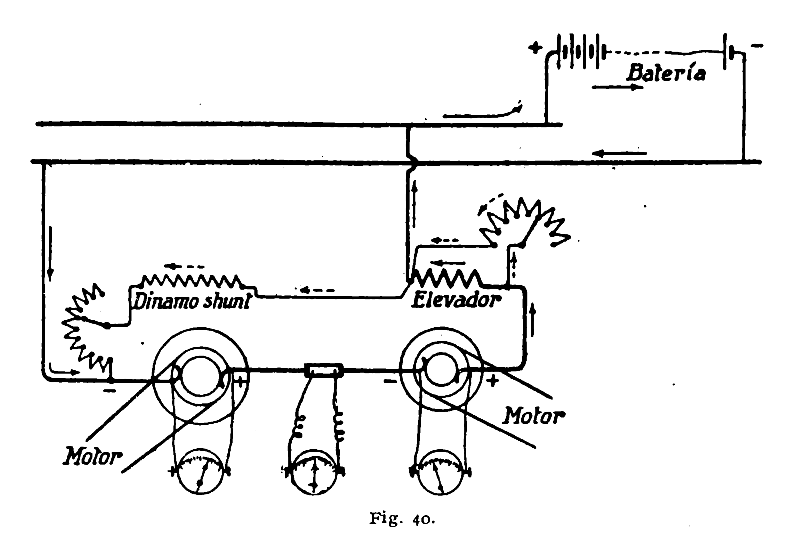


Fig. 40.

permanece sensiblemente constante para valores de la corriente comprendidos entre límites bastante alejados. (Hay que comprobar que se suman los flujos de los devanados shunt y serie.)

CAPÍTULO III

Propiedades de las dinamos, según su excitación

I. — Características

Las *características* de una máquina generatriz son curvas que representan las relaciones existentes entre las diversas cantidades que caracterizan el funcionamiento de la máquina, a saber: fuerza electromotriz E, diferencia de potencial U en los bornes, corriente principal I (producida en el circuito exterior), corriente de excitación i, y velocidad N (en vueltas por minuto).

Hay muchas curvas de esta clase, pero solamente tres tienen interés verdaderamente práctico, que son las siguientes:

a) *La característica en vacío*, o *en circuito abierto*, que expresa gráficamente la relación que existe entre la f. e. m. E de la máquina y la corriente de excitación i, para una velocidad dada N, que se mantiene constante. Esta curva se expresa analíticamente de este modo: $E = f(i)$, para una velocidad dada.

b) *La característica externa*, o *en carga*, que representa la relación entre la d. d. p. U en los bornes de la máquina y la corriente producida I para una velocidad dada N. Esta es la curva $U = f(I)$, para un número de vueltas por minuto igual a N.

c) *La curva de regulación*, que traduce gráficamente la relación entre la corriente producida I y la corriente de excitación i, para una velocidad dada N de la máquina y una diferencia de potencial en los bornes conocida U, ambas constantes durante el tiempo de que se trata. Esta es la curva $I = f\ (i)$.

Característica en vacío. —La característica en vacío permite estudiar el sistema inductor de la máquina (circuito magnético y número de espiras inductoras), viendo si responde a las condiciones particulares a que ha de satisfacer la máquina en cuestión. En efecto, se sabe que la fuerza electromotriz de una dinamo tiene por valor:

$$E = K N \Phi,$$

donde K es una constante que sólo depende de la construcción de la máquina y no de sus condiciones de funcionamiento, N la velocidad de la máquina y Φ el flujo útil que atraviesa el circuito magnético. Por consiguiente, si la velocidad es constante, esta f. e. m. es proporcional al flujo Φ, y como este flujo es proporcional a la inducción del circuito magnético, resulta que la inducción es proporcional a E.

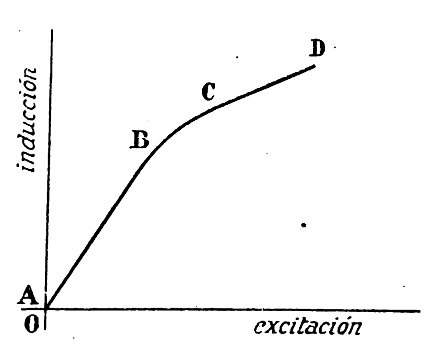


Fig. 41.

Por consiguiente, la característica en vacío $E = f\ (i)$ representa también, tomando una escala conveniente

para las ordenadas, los valores de la inducción en una parte determinada del circuito magnético, correspondientes a los distintos valores de la corriente de excitación; por esta razón se llama también a esta característica *curva de magnetismo* de la máquina, y su forma es la indicada en la figura 41.

En efecto, para valores pequeños de la corriente de excitación, el circuito magnético está muy lejos de su saturación, siendo el coeficiente de permeabilidad muy elevado y sensiblemente constante (1). A estos valores corresponde la parte casi rectilínea AB de la curva. Al crecer la corriente de excitación se llega a valores para los cuales se satura el circuito, el coeficiente de permeabilidad disminuye y la curva forma un codo BC. A partir de estos valores la corriente de excitación sigue aumentando, el coeficiente de permeabilidad es pequeño, permaneciendo casi constante, y la curva vuelve a tomar la forma rectilínea CD.

En general, esta curva no pasa por el origen O, a causa del magnetismo remanente que tiene la máquina.

Se ve que con la característica en vacío se puede saber el estado de saturación del circuito magnético para una corriente de excitación dada, lo cual permite, como veremos para diferentes tipos de máquinas, comprobar que la dinamo está bien construída, o en caso contrario, deducir sus efectos de construcción y las modificaciones que hay que introducir.

Trazado de la característica en vacío. — Para trazar esta curva se mueve la dinamo en cuestión, con su velocidad de régimen, por un motor, cuya velocidad pueda mantenerse rigurosamente constante. Los inductores se alimentan con otro generador de tal modo

(1) Véase tomo I, GENERALIDADES, pág. 174.

que se pueda hacer aumentar la corriente de excitación poco a poco desde cero hasta un valor máximo, y después disminuirla otra vez hasta cero, *sin cortar nunca el circuito.* Con un amperímetro se miden los valores de la corriente de excitación, y un voltímetro derivado en los bornes de la generatriz dará para cada valor de la corriente de excitación el valor de la f. e. m. desarrollada.

Finalmente con un taxímetro o con un cuentarrevoluciones, se ve si al leer las indicaciones del amperímetro y del voltímetro la velocidad permanece constante. En caso contrario se hace que lo sea y se leen nuevamente dichas indicaciones. Si no es posible mantener constante la velocidad se anota su valor al hacer las lecturas del voltímetro y del amperímetro.

Haciendo una sencilla corrección se podrá calcular cuál habría sido la f. e. m. de la máquina si se hubiera tenido la velocidad de régimen. En efecto, sea N la velocidad para la cual debe tomarse la característica, y sea N' la velocidad medida en un momento determinado, E' la f. e. m. dada por el voltímetro, y E la f. e. m. que se quiere saber, correspondiente a N vueltas. Para la corriente de excitación leída, atraviesa la armadura del inducido un flujo Φ. y se sabe que si la máquina gira a N' vueltas, su f. e. m. es:

$$E' = K N' \Phi;$$

si girase a N vueltas se tendría:

$$E = K N \Phi,$$

por consiguiente:

$$\frac{E}{E'} = \frac{N}{N}, \text{ de donde, } E = E' \frac{N}{N'}.$$

Los resultados se resumen en la tabla siguiente:

	EXCITACIÓN			F. E. M.			VELOCIDAD	FACTOR de corrección	F. E. M. a N v/m
	Lecturas	Shunts	Corriente i	Lecturas	Sensibilidades	Volts. E'	v/m N'	$N : N'$	$E = E' \times \frac{N}{N'}$
Excitación creciente									
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Excit. decreciente									

La característica se obtiene tomando como abscisas los valores de i y como ordenadas los valores correspondientes de E. Generalmente resultan dos curvas: una ABC dada por los valores crecientes de la excitación, y otra CDG, por los valores decrecientes. Esta última, a causa de la histeresis del circuito magnético, pasa un poco por encima de la primera.

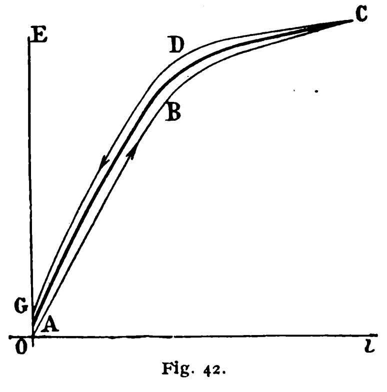


Fig. 42.

La característica en vacío estará dada por una curva comprendida entre

estas dos y que dé para cada excitación la media de las dos f. e. m. de la máquina cuando se llega a esta excitación por valores decrecientes o crecientes (figura 42).

OBSERVACIÓN. — Las lecturas deben hacerse exactamente en el mismo instante para todos los aparatos, sobre todo si puede haber variaciones en la velocidad del motor o en la intensidad de la corriente de excitación. En este caso es necesario proceder del modo siguiente: se coloca un observador frente a cada aparato, y cuando el que anota las lecturas del taxímetro ve que la aguja queda fija indicando la velocidad deseada, hace una señal a los otros dos para que cada uno lea en seguida las indicaciones del amperímetro y del voltímetro respectivamente.

II. — Estudio de una dinamo shunt

a) **Trazado de la característica en vacío.** — El circuito de excitación se alimenta, a ser posible, por una batería de acumuladores; por ser constante la tensión en los bornes, la corriente de excitación permanecerá invariable durante las lecturas correspondientes a un punto de la curva. Si el manantial de corriente es una dinamo, hay que tener en cuenta las posibles variaciones de la corriente de excitación durante una medida, y tomar las precauciones ya indicadas. Como el circuito de excitación es muy resistente, para obtener una variación bastante grande habrá que emplear un reostato muy resistente, uno de los cuales, de empleo muy cómodo, es el reostato de lámparas de incandescencia en paralelo, shuntado por un reostato ordinario, metálico o líquido. Al principio todas las lámparas están fuera de circuito y la manivela del reostato está en el tope muerto; se hace girar entonces la

máquina sin excitación a la velocidad normal, utilizando para el voltímetro una de las sensibilidades menores. De este modo se obtiene la f. e. m. debida al magnetismo remanente; después se van intercalando lámparas poco a poco, aumentando la corriente de excitación.

Cuando ya se ha intercalado un número suficiente de lámparas, se avanza poco a poco la manivela del

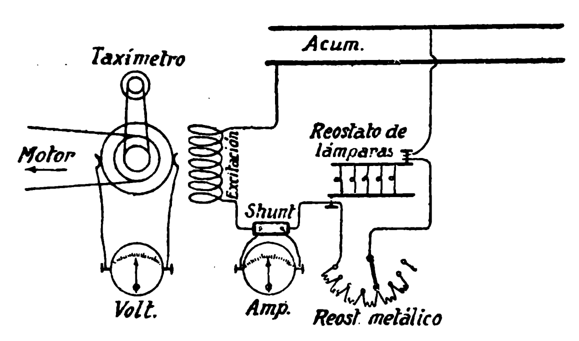


Fig. 43.

segundo reostato hasta el tope de cortocircuito, teniéndose la máxima corriente de excitación. Es evidente que la tensión del generador secundario debe ser mayor que la tensión normal de la máquina funcionando como dinamo shunt.

Se disminuye después la corriente moviendo el reostato en sentido inverso y suprimiendo cada vez más lámparas.

El esquema de montaje es el representado en la figura 43.

Observación I. — Si no se dispone de un generador distinto de la máquina que se estudia, se puede hacer que ésta funcione como dinamo shunt; entonces el montaje es el representado en la figura 44. Pero en este caso el voltímetro no indica rigurosamente el valor

de la f. e. m. desarrollada: en efecto, si el inducido de la máquina de resistencia *r* está atravesado por la corriente de excitación *i*, se produce una caída de tensión *ri* y el voltímetro no da la f. e. m. *E*, sino

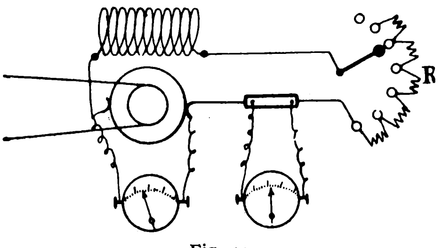


Fig. 44.

el valor $E - ri$. Ahora bien, en las máquinas de poca potencia, *ri* es bastante grande y el error no es despreciable. Para las máquinas de potencia media y de gran potencia se puede despreciar este error cometido en la medición de la f. e. m.

OBSERVACIÓN II. — Puede darse el caso de que la máquina no se encebe, es decir, de que la f. e. m. permanezca muy pequeña aun cuando se haga avanzar poco a poco la manivela del reostato *R* hacia el tope de cortocircuito. Esto se debe al mal sentido de las conexiones entre el circuito inductor y las escobillas o a un contacto mal establecido en cualquier punto del circuito formado por el inducido, el reostato y los carretes inductores.

El primer defecto se comprueba fácilmente del modo siguiente: estando el reostato *R* en el tope muerto y girando la máquina a una velocidad conveniente, el voltímetro de poca sensibilidad da la f. e. m. debida al magnetismo remanente. Sin cambiar la sensibilidad del voltímetro, se avanza la manivela del reostato; si la f. e. m. indicada disminuye, es señal de que la corriente producida por la máquina se opone al mag-

netismo remanente, lo cual se debe a que no están bien establecidas las conexiones entre el circuito inductor y las escobillas. En este caso hay que invertir las conexiones, o mediante un generador auxiliar invertir el sentido del magnetismo remanente, o cambiar el sentido de rotación.

Al contrario, si la f. e. m. debida al magnetismo remanente no cambia o aumenta muy poco cuando se avanza la manivela del reostato R, es señal de que el circuito está interrumpido en algún punto. Se revisa este circuito; si no está cortado, puede haber un mal contacto entre el colector y las escobillas; se levantan las escobillas y se dejan caer de golpe contra el colector, sobre el cual se las apoya fuertemente. Si el mal contacto es la causa de no encebarse la máquina, se verá subir de punto la f. e. m. Finalmente, si no sucede esto, hay una rotura en las espiras inductoras, lo cual puede comprobarse midiendo la resistencia de este circuito, con el ohmímetro, por ejemplo.

Punto de funcionamiento. — Supongamos la máquina montada en dinamo shunt sin reostato de excitación. La corriente i producida por el circuito inductor es pequeña y la f. e. m. E de la máquina es casi igual a la d. d. p. entre las escobillas; esta d. d. p. está medida por la caída de tensión en el circuito de resistencia R, y tiene por valor:

$$u = Ri \qquad \text{y} \qquad E = u.$$

Por consiguiente, la máquina funciona en condiciones tales, que satisface a las dos igualdades siguientes:

$$E = f(i) \qquad \text{y} \qquad E = u = Ri.$$

La curva $E = f(i)$ es la característica en vacío; la curva representativa de $u = Ri$ es una recta fácil de

trazar si se ha medido la resistencia R del circuito inductor. El punto en que esta recta corta a la característica en vacío es el *punto de funcionamiento* (fig. 45). Si mediante el reostato de excitación se ponen resistencias en serie con el circuito inductor, la recta $u = Ri$ se irá alzando y el punto de funcionamiento irá bajando, pasando sucesivamente por A_1, A_2, A_3,... (fig. 46).

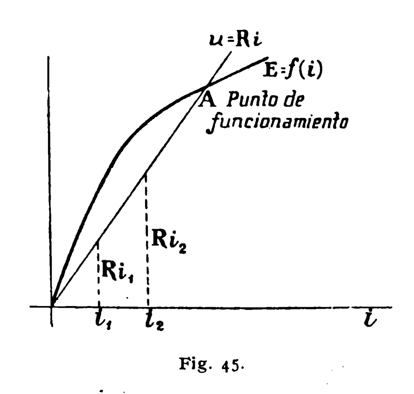


Fig. 45.

El punto de funcionamiento A debe encontrarse un poco por encima del codo de la característica en vacío. En efecto:

1.º Si se produce un pequeño aumento de resistencia en los inductores, a consecuencia, por ejemplo, de su caldeamiento, la recta $u = Ri$ se alzará un poco; pero como el punto en que corta a la característica en vacío está en una parte en que esta curva está muy poco inclinada respecto al eje de las i, la disminución de la ordenada del punto de funcionamiento es despreciable, y la tensión en los bornes de la máquina permanece casi constante (fig. 47). Al contrario, si el punto de funcionamiento estuviese por

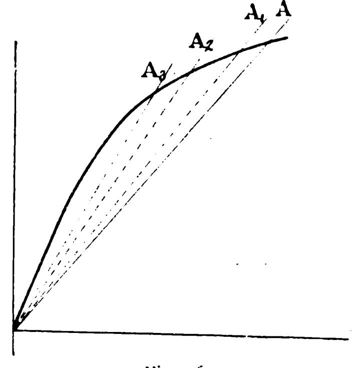


Fig. 46.

debajo del codo, la tensión sería muy variable, porque un ligero aumento en la resistencia de los inductores produciría un descenso considerable en la tensión (fig. 48).

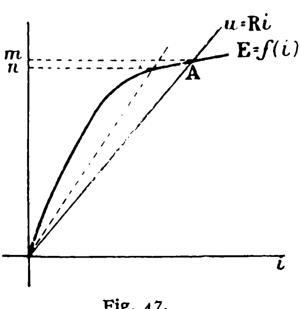


Fig. 47.

2.º Las máquinas shunt están destinadas a alimentar circuitos a tensión constante; sabemos que si la corriente producida aumenta, la tensión disminuye, y que se hace que vuelva a su valor primitivo disminuyendo convenientemente la resistencia del reostato de excitación. Ahora bien, se ve en la figura 48, que si el punto de funcionamiento está por debajo del codo de la característica, al pasar de un tope a otro del reostato, la disminución de la resistencia del circuito de excitación producirá un aumento muy grande en la tensión, que pasará bruscamente de su valor normal. Al contrario, si el punto de funcionamiento está por encima del codo, se podrá hacer que aumente poco a poco la tensión a medida que tienda a descender.

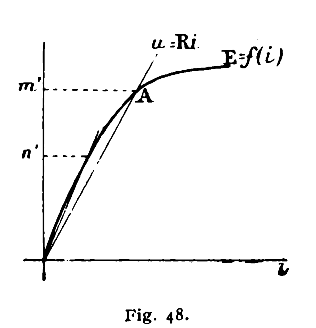


Fig. 48.

Se ve, por consiguiente, que es preciso después de construir una máquina trazar su característica en vacío y determinar su punto de funcionamiento. Si este punto se encuentra por debajo del codo de la característica, hay un defecto de construcción: o la resistencia R del circuito inductor es demasiado elevada y el ángulo que forma la recta $u = Ri$ con el eje de las i es

muy grande, o bien la curva $E = f\ (i)$ está demasiado inclinada sobre este eje, y por lo tanto, para una corriente de excitación i, la f. e. m. de la máquina es muy pequeña, y el flujo que atraviesa el circuito magnético es insuficiente; por consiguiente, la reluctancia del circuito magnético es demasiado grande o la fuerza magnetomotriz (es decir, el número de espiras inductoras) es demasiado pequeña.

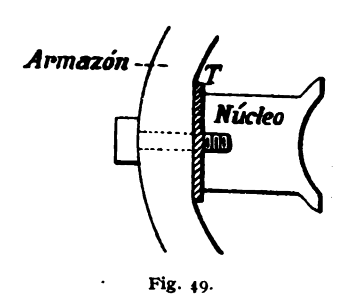


Fig. 49.

A veces se puede corregir este defecto disminuyendo el entrehierro, si es posible hacer esta operación: si las piezas polares son postizas en la armazón, se puede conseguir esto empleando cuñas formadas con planchas delgadas de hierro dulce, que se intercalan entre el núcleo y la armazón (fig. 49).

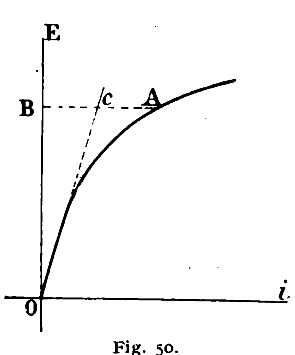


Fig. 50.

OBSERVACIÓN I.—De lo expuesto se deduce que desde el punto de vista de la buena marcha de la máquina, no hay inconveniente alguno en que el punto de funcionamiento esté muy por encima del codo de la característica. Pero entonces la máquina no ha sido bien estudiada desde el punto de vista económico; en efecto, para obtener una saturación bastante elevada, se necesita una reluctancia extremadamente pequeña del circuito inductor y, por consiguiente, una armazón más maciza de lo conveniente, o bien una fuerza mag-

netomotriz excesiva, y entonces un número de espiras inductoras demasiado grande; en los dos casos, el precio de la máquina resulta muy elevado.

OBSERVACIÓN II. — Según Fischer-Hinnen, una máquina shunt bien calculada debe satisfacer a la regla siguiente:

«Si se prolonga la parte recta de la característica hasta que corte en *c* a la paralela al eje de las *i* trazada por el punto de funcionamiento *A*, la parte *Ac* debe ser, cuando más, igual a *Bc*, pero nunca menor que esta longitud» (fig. 50).

b) **Característica externa o en carga.** — Para trazar esta curva se hace el montaje indicado en la

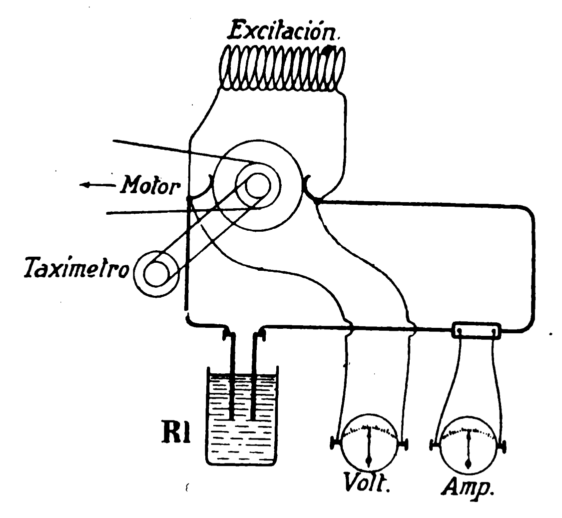


Fig. 51.

figura 51. La máquina es accionada por un motor, a su velocidad normal, dada por un taxímetro, y produce una corriente en un circuito exterior constituído por un reostato (un reostato líquido *Rl*, por ejemplo), y un

amperímetro que da la intensidad de la corriente. Un voltímetro derivado entre las escobillas permite, para cada valor de la corriente producida, medir la d. d. p. en los bornes. Las placas del reostato líquido están completamente fuera del vaso al empezar la operación; la aguja del amperímetro queda en el cero y el voltímetro da la f. e. m. E de la máquina. Se sumergen entonces poco a poco las placas del reostato líquido, leyendo para varias posiciones las indicaciones del voltímetro y del amperímetro, después de asegurarse de que no ha cambiado la velocidad. Como la carga de la dinamo sufre variaciones durante la operación, su velocidad está también sujeta a variaciones; por lo tanto, hay que disponer de un motor con el que se pueda mantener la velocidad constante, cualquiera que sea la corriente producida. Un observador que lea el taxímetro, hará una señal cuando la máquina haya alcanzado su régimen, y entonces otros dos observadores leen simultáneamente el voltímetro y el amperímetro.

Los resultados obtenidos se resumen en un cuadro como el siguiente:

Velocidad: N v/m =

CORRIENTE PRODUCIDA			D. D. P. EN LOS BORNES		
Lecturas	Shunts	Amperes: I	Lecturas	Sensibilidades	Volts: U

Se construye la curva tomando como abscisas los diferentes valores de I y como ordenadas los valores

correspondientes de U; esta curva tiene la forma indicada en la figura 52.

Para una corriente cero (circuito exterior abierto), la d. d. p. oA en los bornes mide la f. e. m. de la máquina; para una corriente I_1, la d. d. p. está dada por la ordenada BM y la caída de tensión correspondiente es oA menos BM, o también $BN-BM=MN$. Esta caída es debida en parte a la disminución de la excitación y en parte a la caída óhmica en el inducido, y a la reacción del inducido [1].

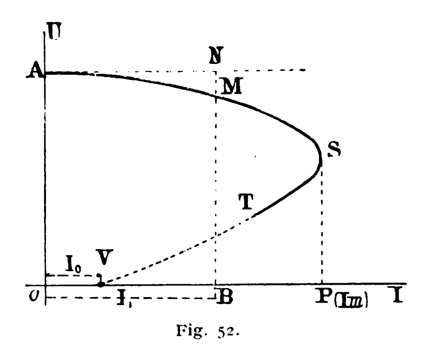


Fig. 52.

Cuando se disminuye poco a poco la resistencia exterior, la corriente producida aumenta, al mismo tiempo que disminuye la d. d. p. en los bornes. La intensidad de la corriente alcanza un máximo I_m, representado en la figura 52 por oP; a partir de este valor, la resistencia exterior R sigue disminuyendo así como la corriente, y la d. d. p. que siempre tiene por valor el producto RI, disminuye al mismo tiempo, presentando la curva una parte ST, descendente a la izquierda. Esta parte de la curva, si se prolongara, cortaría al eje de las abscisas en un punto V, correspondiente a una intensidad $I_0 = oV$ determinada del modo siguiente: sea E_0 la f. e. m. debida al magnetismo remanente; cuando la resistencia exterior R es nula, la má-

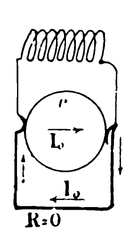


Fig. 53.

(1) Véase tomo I, GENERALIDADES, pág. 320.

quina está cerrada sobre la resistencia r del inducido, y la corriente producida es: $I_0 = \frac{E_0}{r}$, siendo nula la diferencia de potencial $U_0 = RI_0$, por ser cero la resistencia R (fig. 53).

Es imposible, en general, obtener esta parte ST de la característica, porque cuando la corriente se acerca a su valor máximo I_m, la intensidad es excesiva y podría dar lugar a que se quemara la dinamo, y si se disminuye mucho la resistencia exterior para obtener la parte baja de la curva, y por consiguiente una corriente que pueda muy bien soportar el devanado inducido, se desenceba la máquina bruscamente. Esta parte de la curva puede trazarse sin dificultad cuando el inducido es muy resistente.

OBSERVACIÓN I. — Si se dispone, como sucede en casi todos los laboratorios, de una batería de acumuladores provista de un reductor para ir utilizando cada vez menos elementos, se puede emplear la energía dada por la máquina que se estudia en cargar la batería, en vez de perderse inútilmente en una resistencia. Para ello, las dos escobillas de la máquina se unen respectivamente a un polo de la batería y a la manivela del reductor, a través de un interruptor (fig. 54).

Se hace girar en primer término la dinamo en vacío con su velocidad normal y se ve su fuerza electromotriz en el voltímetro V_1; se toman entonces en la batería los elementos necesarios para que la f. e. m. dada por el voltímetro V_2 sea algo inferior a la de la máquina; se comprueba si la máquina y la batería están montadas en oposición, y se cierra el interruptor I. El amperímetro A da entonces la corriente producida por la máquina, y el voltímetro V_1, la d. d. p. U correspondiente en los bornes. Avanzando poco a poco la manivela M del reductor en el sentido de la fle-

cha F, se disminuye la f. e. m. de la batería opuesta a la de la dinamo y se aumenta la corriente como con un reostato.

En el esquema de la figura 55 se ve el montaje efectuado para trazar en estas condiciones la caracte-

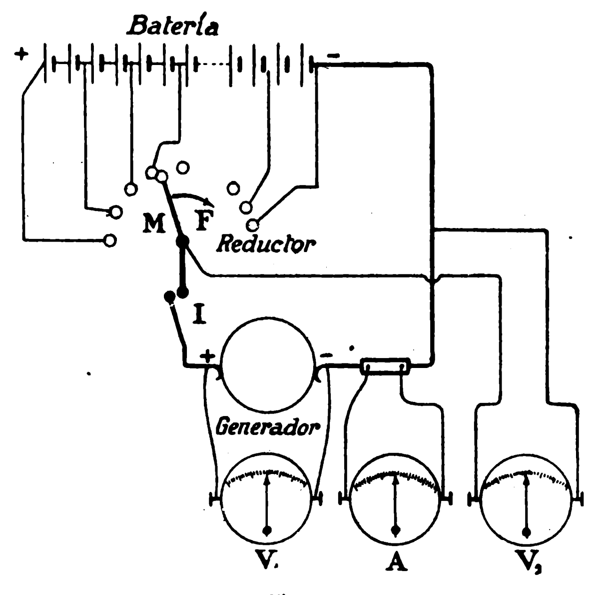


Fig. 54.

rística en carga, cuando el motor que mueve a la dinamo está alimentado por la batería, a la cual vuelve la energía recogida en las escobillas de la máquina. El número de elementos que alimentan el motor está dado por el reductor R_1; los elementos cargados por la máquina están limitados por el reductor R_2.

OBSERVACIÓN II. — *Variaciones de velocidad.* — Mientras se traza la característica en carga, la velocidad debe permanecer constante, pero puede suceder que a pesar de las precauciones tomadas, esta velocidad

experimente variaciones, en cuyo caso hay que aplicar a los resultados que se obtengan las oportunas correcciones.

Sean: U' la d. d. p. obtenida para una velocidad N', siendo N la velocidad de régimen de la má-

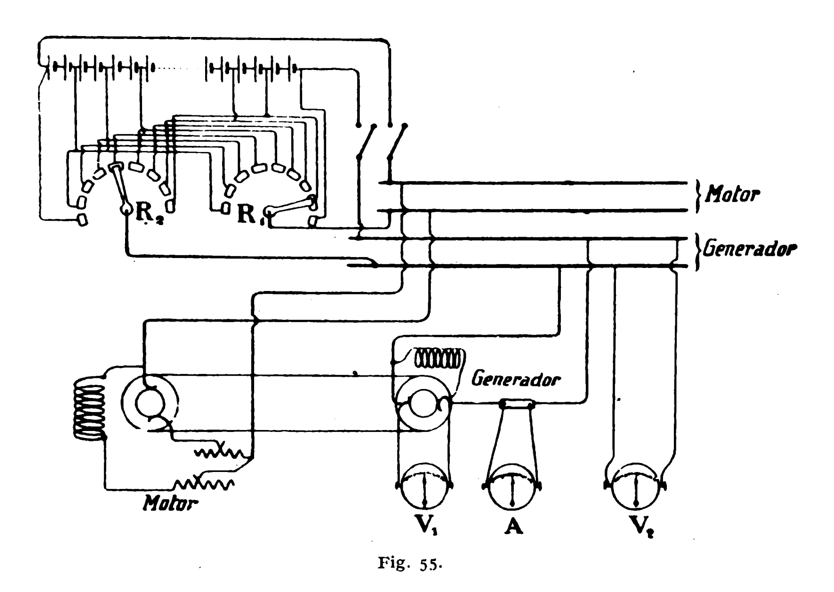


Fig. 55.

quina; E' la f. e. m. de la máquina a N' vueltas, y E la f. e. m. a N vueltas. Se sabe que entre estas cantidades se cumplen las siguientes condiciones:

$$U = E - e \tag{1}$$
$$U' = E' - e \tag{2}$$

donde e es la caída de tensión debida a la resistencia óhmica y a la reacción del inducido; su valor es el mismo en los dos casos, a igualdad de corriente producida.

Por otra parte, hemos visto que:

$$\frac{E}{E'} = \frac{N}{N'} \quad \text{de donde} \quad E' = E \times \frac{N'}{N};$$

sustituyendo este valor de E' en (2), se tiene:

$$U' = E \frac{N'}{N} - e,$$

de donde:

$$E = (U' + e) \frac{N}{N'},$$

y sustituyendo E por este valor, en (1), resulta:

$$U = (U' + e) \frac{N}{N'} - e,$$

o sea:

$$U = U' \times \frac{N}{N'} + e\left(\frac{N}{N'} - 1\right).$$

Si las variaciones de velocidad no son grandes, e tiene un valor muy pequeño, N' difiere poco de N, y el término $e\left(\frac{N'}{N} - 1\right)$ puede despreciarse, por ser producto de dos factores muy pequeños, y la igualdad anterior se convierte en esta otra:

$$U = U' \times \frac{N}{N'}.$$

Por consiguiente, para variaciones pequeñas de velocidad (inferiores al 5 %), se podrán corregir los valores encontrados para la d. d. p. en los bornes. Entonces los resultados obtenidos se resumen en un cuadro como el siguiente:

Velocidad de régimen N v/m =

Velocidad N'	CORRIENTE PRODUCIDA			D. D. P EN LOS BORNES			Corrección $\frac{N}{N'}$	D. D. P. a N vueltas $U = U'\frac{N}{N'}$
	Lecturas	Shunts	Amperes I	Lecturas	Sensibilidad	Volts U'		

Estudio de la característica en carga. — Con esta curva se puede medir el valor de la caída de tensión, para cada intensidad de la corriente producida. Si estas caídas son demasiado grandes, es muy difícil, por no decir imposible, regular la máquina, o sea mantener su tensión constante cualquiera que sea la corriente producida; en este caso la máquina ha sido mal calculada. Se puede ver si el defecto proviene de una caída de tensión excesiva, debida a una resistencia demasiado grande del inducido o a una reacción del inducido también muy grande. Para ello se trazan las curvas de caída de tensión del modo siguiente.

c) **Curvas de las caídas de tensión.** — 1.° *Reacción total del inducido.* — Es la suma de la caída óhmica en el inducido y de la caída de tensión debida a la reacción propia del inducido, es decir, producida por el campo que crea la corriente en el inducido.

Para trazar la curva representativa de las variaciones de esta caída total, en función de la corriente producida por la máquina, se procede del modo siguiente.

Se monta la dinamo con excitación separada, manteniendo constante el valor correspondiente a la carga media; se hace que la máquina dé una corriente cada vez mayor hasta alcanzar su valor máximo, manteniendo constante su velocidad, y se lee la corriente producida y la tensión en los bornes.

Si durante la prueba se producen pequeñas variaciones de velocidad, se corrigen las lecturas admitiendo que la tensión varía proporcionalmente a la velocidad. Los resultados obtenidos se resumen en un cuadro como el siguiente:

Velocidad $N =$ Excitación $i =$

CORRIENTE producida			TENSIÓN entre las escobillas			Velocidad	Corrección	Tensión a N vueltas
Lecturas	Shunts	Amperes I	Lecturas	Sensibilidad	Volts U'	N'	$\frac{N}{N'}$	$U = U' \frac{N}{N'}$

Se traza una curva cuyas abscisas sean los valores de I y cuyas ordenadas sean los valores correspondientes de U, resultando una curva de la forma AMN indicada en la figura 56; la ordenada OA correspondiente a la abscisa cero mide la fuerza electromotriz de la máquina, que es constante por permanecer invariables la corriente de excitación y la velocidad. La diferencia entre las ordenadas de la recta trazada por A, paralelamente al eje de las abscisas, y las ordenadas correspondientes de la curva miden la caída de tensión. Para una corriente medida por la abscisa OP la reacción total del inducido está dada por la longitud MQ; llevando esta longitud a partir de P, se obtiene un punto S de la curva que representa los valores de la reacción total del inducido en función de la corriente producida.

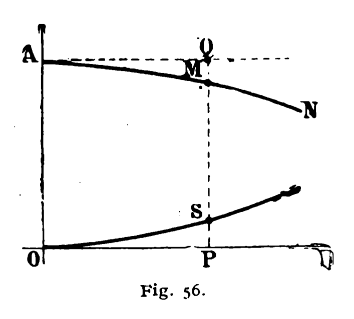


Fig. 56.

El montaje para esta prueba es el indicado en la figura 57.

2.º *Caída óhmica.* — Sea R la resistencia del inducido, que puede medirse sin dificultad alguna; para

una corriente producida I, la caída óhmica es RI, y la curva que representa los valores de esta caída de ten-

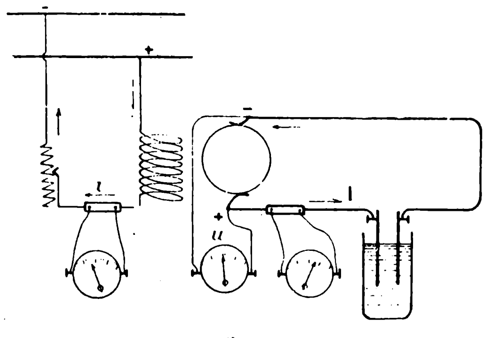


Fig. 57.

sión en función de la corriente producida será una recta (fig. 58).

3.º *Reacción propia del inducido.* — Esta reacción tiene por valor, para cada intensidad de la corriente producida, la diferencia entre la reacción total y la caída óhmica; la curva representativa III de sus valores en función de la corriente I se deduce de las dos curvas precedentes (fig. 58).

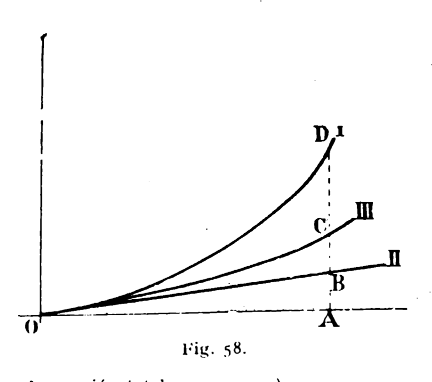


Fig. 58.

I, reacción total
II, caída óhmica
III, reac. propia del inducido } $AC = AD - AB$

OBSERVACIÓN I. — Si la construcción de la máquina ha sido bien hecha, la caída de tensión producida por la resistencia óhmica del inducido, cuando la máquina produce su corriente normal, debe ser de 3 a 5 % de la tensión normal; en

cuanto a la reacción propia del inducido, debe ser aproximadamente igual al doble de la caída óhmica.

OBSERVACIÓN II. — Si se trazan las curvas de reacción total del inducido para diversos valores de la excitación, se tiene un haz de curvas análogo al representado en la figura 59. Las curvas correspondientes a las excitaciones pequeñas están por encima de las que corresponden a grandes valores de la corriente de excitación, porque en el primer caso el flujo inductor principal es menor que en el segundo, ya que el circuito magnético sobre el cual se cierra el flujo producido por las espiras inducidas está menos saturado y es más permeable, por lo cual es mayor la pérdida del flujo inductor. Sin embargo, estas curvas distan tan poco unas de otras, que se pueden considerar confundidas todas en una sola, que es la curva de reacción del inducido de la máquina.

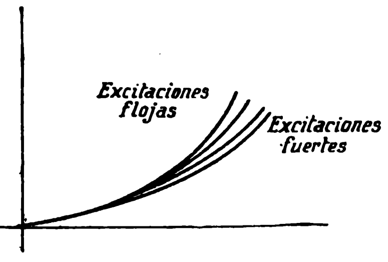


Fig. 59.

Característica en carga, deducida de la característica en vacío y de la curva de reacción total del inducido. — Supongamos que hemos trazado, del modo que hemos indicado, las curvas siguientes:

1.ª La característica en vacío a N vueltas por minuto, $E = f(i)$;

2.ª La curva de reacción total del inducido a la misma velocidad, $e = f'(I)$;

3.ª La recta $u = ri$, siendo r la resistencia del circuito inductor.

De estas tres curvas se puede deducir la característica en carga. En efecto, consideremos una co-

rriente I medida por la longitud OA y veamos cuál es la diferencia de potencial en los bornes de la máquina, para esta corriente (fig. 60). La caída de tensión para esta corriente está dada por la ordenada AB de la

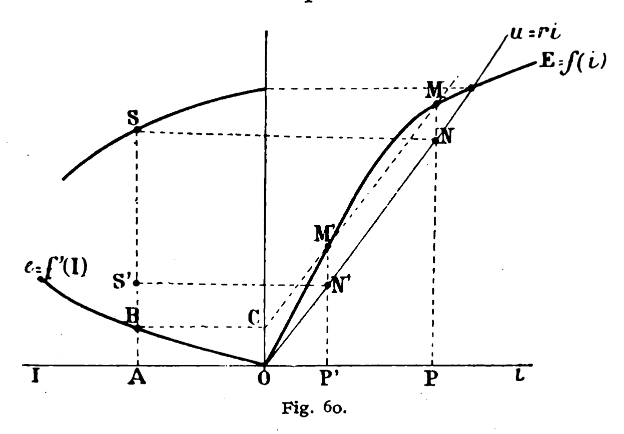


Fig. 60.

curva $e = f'(I)$, por lo cual es preciso buscar cuál es la diferencia de potencial en los bornes a que corresponde la caída de tensión AB. Ahora bien, las caídas de tensión $E - u$ están dadas por las diferencias entre las ordenadas de la curva $E = f(i)$ y las de la recta $u = ri$, de modo que hay que ver cuál es el punto de esta recta a que corresponde una diferencia entre las ordenadas igual a AB. Para ello, basta hacer la siguiente construcción: por el punto B se traza una paralela al eje OA, que cortará al eje de las ordenadas en C; por C se traza una paralela a la recta $u = ri$ que corta a la característica en vacío en dos puntos M y M' cuyas ordenadas encuentran a la recta en dos puntos N y N'. Se ve fácilmente que se verifican las siguientes igualdades:

$$NM = N'M' = AB,$$

luego PN y $P'N'$ miden las diferencias de potencial

en los bornes de la máquina para las cuales la caída de tensión es igual a AB; por consiguiente, éstas son las dos diferencias de potencial en los bornes cuando la corriente producida es $I = OA$. Llevando sobre la perpendicular trazada por A a OA dos longitudes iguales respectivamente a PN y a $P'N'$, se obtienen dos puntos S y S' de la característica en carga. Repitiendo esta construcción para los diferentes valores de la corriente producida, se obtienen puntos que unidos con un trazo continuo dan dicha característica en carga. Unicamente la parte superior de esta curva corresponde a una marcha estable de la máquina y presenta interés. Esta construcción que acabamos de indicar se debe al señor Picou.

OBSERVACIÓN I. —Mediante una construcción inversa se puede, conocida la característica en carga, determinar el valor de la reacción total del inducido de la máquina.

Sea I una corriente dada para la cual se quiere conocer la reacción total del inducido. Se toma OA, que es la medida de I en la escala adoptada, y se traza por A una perpendicular a OA, que cortará a la característica en carga en S; por S se traza una paralela a OA, que cortará a su vez a la recta $u = ri$, en N; la ordenada de N corta a la característica en vacío en M. Por M se traza la paralela a la recta $u = ri$ que cortará al eje de las ordenadas en C, y trazando por C una paralela a OA, encontrará a AS en B, y la longitud AB mide la caída de tensión, que es lo que se quería saber.

OBSERVACIÓN II. — Para trazar la característica en carga o la de reacción total del inducido, hay que disponer de una potencia suficiente para alimentar un motor que pueda mover la máquina en carga. Puede suceder que no se disponga de bastante

potencia, en cuyo caso se puede tener una idea aproximada de las tensiones en los bornes de la máquina para diferentes corrientes producidas, del modo siguiente.

Se admite que la reacción propia del inducido es el doble de la caída óhmica; se mide la resistencia R del inducido, con lo cual se puede construir la recta $u = RI$. Se duplica el valor de $R\,I$ para los valores de I que se aproximen a la corriente normal y se construye de este modo la curva de reacción del inducido de la máquina (fig. 61).

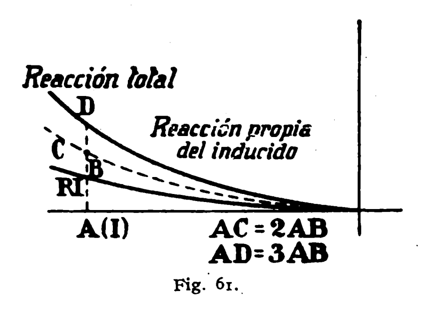


Fig. 61.

Repitiendo entonces la construcción de Picou, se obtiene con bastante aproximación la característica en carga de la dinamo.

d) **Curva de regulación.** — Esta curva da el valor de la corriente de excitación necesaria para tener en los bornes de la máquina su tensión normal para una corriente dada. Esta es la curva que representa la función $I = f\,(i)$, para un valor constante de U.

Supongamos que cualquiera que sea la corriente producida por la dinamo, se quiera mantener entre sus bornes la tensión U volts. El montaje se hará conforme indica el esquema de la figura 62.

En serie con el circuito de excitación hay dos reostatos, uno muy resistente R de topes, y otro líquido de poca resistencia R_1 para variar de un modo casi inapreciable la resistencia del circuito. La máquina puede producir su corriente sobre un circuito exterior

formado por un reostato de lámparas L y por un reostato líquido R_2 en paralelo. Un amperímetro A_1 está intercalado en el circuito de excitación,

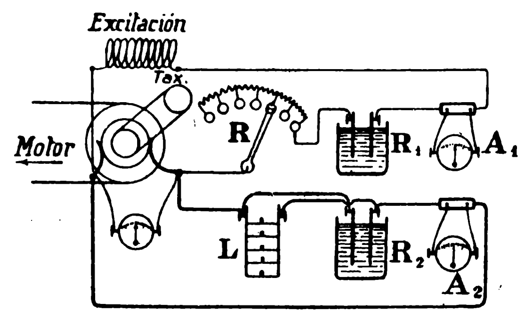


Fig. 62.

y otro A_2 en el circuito principal, habiendo entre las escobillas de la máquina un voltímetro montado en derivación.

Se empieza por hacer que la máquina dé una corriente débil (las placas del reostato líquido R_2 se levantan para que no formen parte del circuito) y mediante los reostatos R y R_1 se hace variar la corriente de excitación para obtener la tensión dada U en los bornes de la dinamo, que como es natural estará girando con su velocidad de régimen. Una vez cumplidas estas condiciones de funcionamiento, se anota la indicación i del amperímetro A_1 y la I del A_2. Se procede de igual manera para corrientes cada vez mayores; cuando todas las lámparas de L estén en circuito, se bajan las placas del reostato R_1, para que siga aumentando la corriente. Los resultados que se obtienen se resumen en un cuadro análogo al siguiente:

Velocidad: $N =$ D. D. P.: $U =$

CORRIENTE PRODUCIDA			CORRIENTE DE EXCITACIÓN		
Lecturas	Shunts	Amperes: I	Lecturas	Shunts	Amperes: I

Se traza una curva que tenga por abscisas los valores de I y por ordenadas los valores correspondientes de i. Esta curva tiene la forma representada en la figura 63; OA mide la corriente de excitación necesaria para obtener en vacío una tensión igual a la d. d. p. dada U. A medida que aumenta la corriente I, la tensión tiende a bajar; para que siempre tenga el valor U hay que aumentar la excitación, como se ve claramente en la forma de esta curva; cuando la corriente es I_1, medida por OP, la corriente de excitación es i_1, medida por PM.

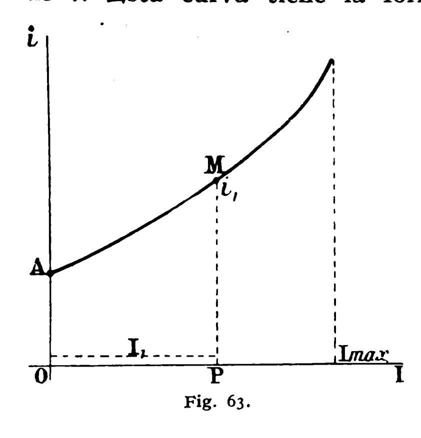


Fig. 63.

Cálculo del reostato de excitación. — Con la curva anterior se puede calcular el reostato de excitación de la dinamo. En efecto, supongamos que esta máquina esté destinada a dar una corriente que varíe de 0 a I_{max}, con una diferencia de potencial de U volts, a N vueltas; si está bien construída debe ser tal, que estando en cortocircuito el reostato de exci-

tación, haya U volts entre sus bornes cuando la corriente que da sea I_{max}. Para una corriente menor I_1 la tensión sería más elevada; para que se mantenga siempre igual a U, habrá que disminuir la corriente de excitación, para lo cual se tendrá que intercalar una resistencia en serie con la excitación. Sea OP la longitud que corresponde a la corriente I_1; la corriente de excitación debe tener un valor medido por PM; sea i_1 este valor. Si r es la resistencia de los inductores, será preciso que en serie con ellos haya una resistencia x que satisfaga a la siguiente relación:

$$\frac{u}{r+x} = i_1;$$

de donde:

$$x = \frac{u - ri_1}{i_1}.$$

Por lo tanto, se pueden calcular los valores de las resistencias del reostato para varios valores de la intensidad de la corriente. En la práctica se calcula la resistencia máxima R del reostato de inducción, que ha de ser tal que *en vacío* la d. d. p. sea igual a u; sea i_0 la corriente de excitación medida por OA. La resistencia máxima de R está dada por la relación siguiente:

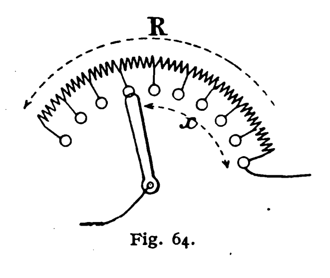


Fig. 64.

$$\frac{u}{r+R} = i_0, \qquad \text{de donde} \qquad R = \frac{u - ri_0}{i_0}.$$

Esta resistencia se divide en cierto número de partes, generalmente iguales (fig. 64).

OBSERVACIÓN. — Se puede trazar la curva de regulación y determinar la resistencia del reostato de exci-

tación sin hacer que la máquina produzca corriente, por medio de la característica en vacío y de la curva de las caídas de tensión determinada aproximadamente del modo que ya sabemos (pág. 68). En efecto, sean OA la característica en vacío $E = f\ (i)$, OB la curva de las caídas totales de tensión $e = f'\ (I)$, y r la resistencia de los inductores (fig. 65). Se trata

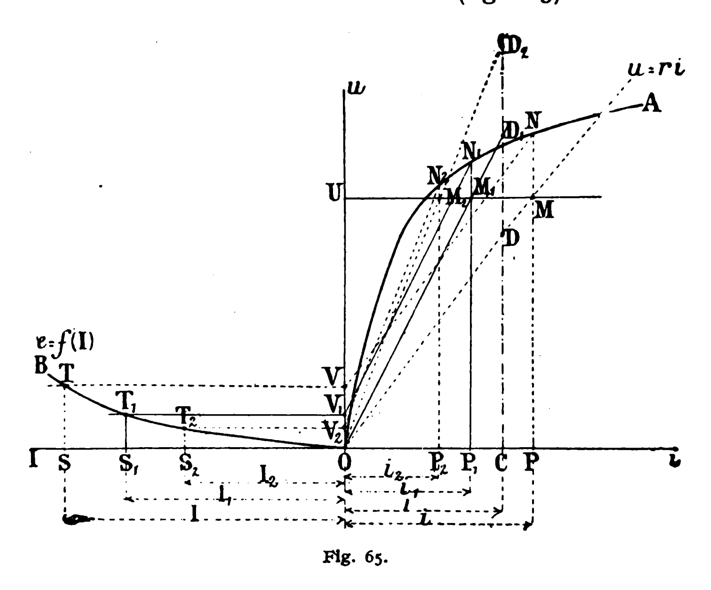


Fig. 65.

de mantener la tensión en los bornes constantemente igual a U, cualquiera que sea la corriente producida. Tracemos la recta $u = ri$, y tomemos sobre esta recta un punto M cuya ordenada mida la tensión dada U, y tracemos por M la paralela al eje de las abscisas. Repitiendo la construcción dada para el trazado de la característica en carga (pág. 65) se obtendrá la corriente máxima I medida por OS que puede dar la máquina para obtener U volts en sus bornes; la corriente de excitación está medida por OP, y es

evidente que es la corriente máxima de los inductores, porque no hay resistencia alguna en serie con ellos.

Veamos cuál es, para otra corriente de excitación i_1, la corriente producida, para la cual la tensión es también U. Para ello se toma $OP_1 = i_1$, se traza por P_1 una perpendicular a Oi que cortará a la paralela trazada por M a Oi en un punto M_1 y a la característica en vacío en el punto N_1; se unen O con M_1, y por N_1 se traza la paralela a OM_1, que corta a OU en V_1, y por V_1 la paralela a OI que corta a la curva OB en el punto T_1, cuya abscisa OS_1 mide la corriente buscada.

Repitiendo para varios valores de la corriente de excitación la misma construcción y trazando una curva que tenga por abscisas los valores i_1 y por ordenadas los valores de I_1 correspondientes, se obtiene la curva de regulación.

Si por el punto C tomado de modo que OC mida un ampere, se traza una paralela a OU, esta recta cortará a las rectas tales como OM_1 en puntos D, D_1, D_2, cuyas ordenadas medirán las resistencias R, R_1, R_2... del circuito de excitación.

CD es la resistencia R de los inductores solos; CD_1 la de los inductores más la resistencia del reostato necesaria para obtener la tensión U correspondiente a la corriente I_1; por consiguiente, la resistencia del reostato $R_1 - R$ estará medida por la diferencia $CD_1 - CD$, etc. De este modo se pueden calcular las distintas resistencias del regulador de inducción o reostato de campo.

EJEMPLO

Estudio de una dinamo en derivación o shunt

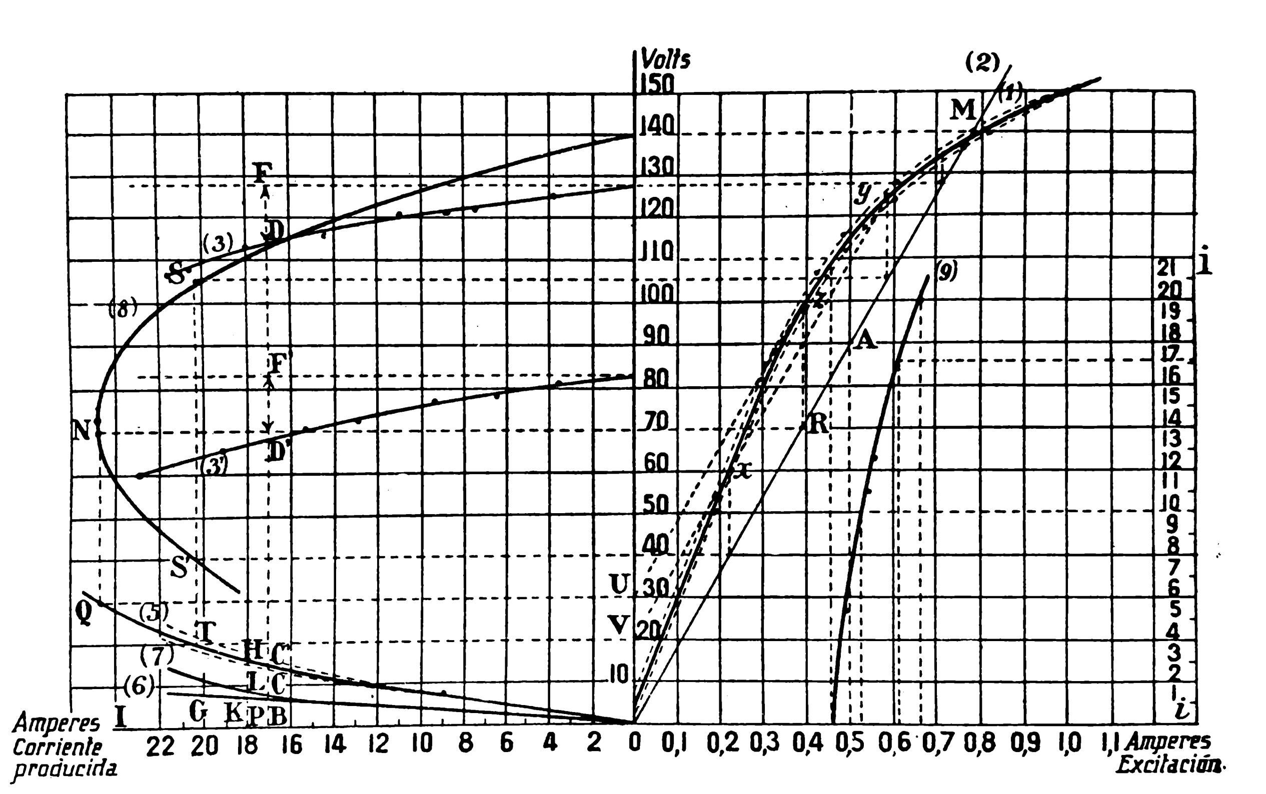
$u = 110$ volts; $I = 17$ amperes;
velocidad = 1950 vueltas por minuto.

1.° **Característica en vacío.** — Procediendo del modo indicado, se obtiene el cuadro siguiente:

$N = 1950 \ ^{v}/_{m}$

	EXCITACIÓN			FUERZA ELECTROMOTRIZ			Velocidad N'	$\frac{N}{N'}$	F.E.M. a N vueltas E
	Lecturas	Shunts	Amperes i	Lecturas	Sensibilidades	Volts E'			
Excitación creciente	0	1	0	127	3	2,54	1960	0,99	2,51
	27	1	0,27	71	150	71	1950	»	71
	40	1	0,40	98	150	98	1950	»	98
	44	1	0,44	105	150	105	1950	»	105
	49	1	0,49	112	150	112	1950	»	112
	53	1	0,53	117	150	117	1950	»	117
	56	1	0,56	120	150	120	1950	»	120
	60	1	0,60	124	150	124	1950	»	124
	64	1	0,64	128	150	128	1950	»	128
	70	1	0,70	132	150	132	1950	»	132
	77	1	0,77	137	150	137	1950	»	137
	81	1	0,81	140	150	140	1950	»	140
	30	3	0,90	73,5	300	147	1950	»	147
	35	3	1,05	78	300	156	1930	1,01	152,5
Excitación decreciente	83	1	0,83	144	150	144	1950	»	144
	78	1	0,78	140	150	140	1950	»	140
	61	1	0,61	128	150	128	1950	»	128
	42	1	0,42	106	150	106	1950	»	106
	31	1	0,31	85	150	85	1950	»	85
	0		0	255	3	5,1	1960	0,99	5

De esta tabla se deducen las dos curvas de puntos de la figura 66, en las cuales están marcados los puntos dados por la misma; la curva que da los valores medios de la fuerza electromotriz para dos corrientes de excitación iguales (una obtenida por valores crecientes y otra por valores decrecientes) está representada de trazo continuo (1) y es la característica en vacío.



Volts
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
Amperes
Corriente
producida
22 20 18 16 14 12 10 8 6 4 2 0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 1,1
Amperes
Excitación.
i
21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
(1)
(2)
(3)
(3')
(5)
(6)
(7)
(8)
(9)
M
A
R
U
V
N
Q
S
S'
F
D
D'
T
H
C
L
G
K
P
B
I
x
y

Fig. 66

2.º **Resistencia del circuito inductor.**

Tensión aplicada entre sus extremos	Corriente	Resistencia
57 volts	0,325 amp.	$\frac{57}{0,325} = 175$ ohms
120 »	0,640 »	$\frac{120}{0,64} = 186$ »

Como valor de esta resistencia, tomaremos $r = 180$ ohms.

3.º **Recta u = r i** (2). — *Punto de funcionamiento.* — Tomando, por ejemplo, por abscisa el valor $i = 0,5$ se obtiene el punto A de la recta, cuya ordenada es $180 \times 0,5 = 90$, y entonces basta unir O con A. Esta recta corta a la característica en vacío en M, que es el punto de funcionamiento; se ve que este punto está situado bastante más arriba del codo de la característica.

4.º **Características en carga, a excitación constante.** — Se han trazado dos características, una conservando la excitación constante a 0,63 amperes, a la velocidad constante de 1 950 vueltas por minuto, y otra con la excitación constantemente igual a 0,30 amperes, y a la misma velocidad que la primera. De este modo se han obtenido los siguientes resultados:

1.º $i = 0,63$ amp. $N = 1950$ vueltas por minuto

CORRIENTE PRODUCIDA			DIFERENCIA DE POTENCIAL		
Lecturas	Shunts	Amperes I	Lecturas	Sensibilidades	Volts U
0	30	0	128	150	128
13	»	3,9	125	»	125
25	»	7,5	122	»	122
36	»	10,8	120	»	120
51	»	15,3	116	»	116
60	»	18,0	113	»	113
68	»	20,4	108	»	108
72	»	21,6	107	»	107

2.º $i = 0{,}30$ amp. $N = 1950$ vueltas por minuto

CORRIENTE PRODUCIDA			DIFERENCIA DE POTENCIAL		
Lecturas	Shunts	Amperes I	Lecturas	Sensibilidades	Volts U
0			83	150	83
37	10	3,7	81	»	81
64	»	6,4	79	»	79
95	»	9,7	77	»	77
43	30	12,9	72	»	72
51	»	15,3	70	»	70
57	»	17,1	68	»	68
64	»	19,2	65	»	65
80	»	24,0	60	»	60
93	»	27,9	53	»	53

Las curvas que así resultan son la (3) y la (3′), de la figura 66.

5.º **Curva de las caídas de tensión.** — a) *Reacción total del inducido.* — Se determina una serie de puntos C de una curva y otra serie C' de otra, definidos por las condiciones (fig. 66):

$$BC = DF \qquad BC' = D'F'$$

y se obtienen dos curvas (4) y (4′), que dan los valores de la reacción total del inducido, la primera para una excitación elevada (0,63 amperes), y la segunda para una excitación pequeña (0,30 amperes). Como se ve en la figura, estas dos curvas están muy cerca una de otra.

La curva (5) comprendida entre estas dos se puede considerar como la curva de reacción total del inducido, cualquiera que sea la corriente de excitación.

b) *Caída óhmica.* — Se mide la resistencia del inducido, siendo los resultados los siguientes:

Tensión aplicada	Corriente producida	Resistencia
3,5 volts	8 amperes	$R = 0{,}437$ ohms
2,4 »	7,2 »	$R = 0{,}330$ »
1,8 »	4,2 »	$R = 0{,}428$ »

Como valor medio se toma 0,4 ohms.

Si I es igual a 20 amperes, la caída óhmica tiene por valor $0{,}4 \times 20 = 8$ volts; uniendo el punto O con el punto G cuyas coordenadas son 20 y 8, se obtiene la recta que da para cada intensidad de la corriente producida la caída óhmica correspondiente.

c) *Reacción propia del inducido.* — La curva de reacción propia del inducido se obtiene tomando para cada valor de la corriente producida I la diferencia entre la reacción total y la caída óhmica:

$$PL = PH - PK = 16 - 7 = 9 \text{ volts.}$$

Construyendo varios puntos como L se tiene esta curva (7).

6.º **Característica externa.** — Aplicando la construcción de Picou, se obtiene por puntos esta característica (8).

T es un punto cualquiera de la curva de reacción total del inducido (5); se traza TV, y por V una paralela a OA que corta a (1) en X e Y, con lo cual se tienen dos puntos S y S'. Para tener el vértice N, se traza la tangente ZU a la característica en vacío paralelamente a OA; por U, la paralela a OI, que corta en Q a la curva (5). El punto N se encuentra en la intersección de la perpendicular a OI trazada por Q con la paralela a OI trazada por R.

7.º **Curva de regulación.** — *Cálculo del regulador de inducción.* — Buscando los valores que ha de tener la corriente de excitación para que girando la máquina a 1950 vueltas por minuto, la diferencia de potencial entre las escobillas sea siempre de 110 volts, cualquiera que sea la corriente producida, se han obtenido los resultados siguientes:

$U = 110$ volts $N = 1950$

CORRIENTE PRODUCIDA	EXCITACIÓN
0,0	0,46
5,6	0,49
10,9	0,53
12,4	0,55
16,0	0,59
20,0	0,66

con los cuales se obtiene la curva (9) de la figura 66.

La resistencia total x del regulador de inducción está determinada por la condición de que, en vacío, la tensión entre las escobillas ha de ser de 110 volts, es decir, que la excitación ha de ser de 0,46 amperes.

Por lo tanto:

$$\frac{110}{180 + x} = 0{,}46,$$

de donde:

$$x = \frac{110 - 180 \times 0{,}46}{0{,}46} = 59 \text{ ohms.}$$

Cuando la máquina produce una corriente de 10 amperes, es preciso, según la curva (9), que la corriente de excitación sea de 0,52 amperes, que corresponde a una resistencia y tal que:

$$\frac{110}{180 + y} = 0{,}52,$$

de donde:

$$y = \frac{110 - 180 \times 0{,}52}{0{,}52} = 31{,}5 \text{ ohms.}$$

La mayor corriente de excitación en las condiciones dadas de funcionamiento es:

$$\frac{110}{180} = 0{,}61 \text{ amperes,}$$

viéndose que esta corriente corresponde a una intensidad de 17,2 amperes. Por lo tanto, esta es la máxima corriente que puede dar la máquina girando a 1950 vueltas por minuto, para que la tensión sea de 110 volts.

III. — Dinamo serie

a) **Característica en vacío.** — Se construye de la misma manera que para una máquina con excitación shunt: el circuito inductor está alimentado por un generador independiente; haciendo crecer poco a poco la corriente de excitación, se anota para valores de la intensidad de esta corriente, el valor correspondiente de la f. e. m., siendo constante la velocidad.

Como el circuito inductor es poco resistente y debe ser recorrido en condiciones normales por la misma corriente producida por la máquina, el generador que alimenta la excitación debe tener una f. e. m. poco elevada, y ha de poder dar una corriente igual por lo menos a la corriente máxima que puede producir la máquina en estudio; por ejemplo, se pueden emplear varios elementos de acumuladores de régimen conveniente. En serie con la excitación se monta un reostato líquido o un reostato metálico de poca resistencia y de sección suficiente.

La característica así obtenida es análoga a la de una dinamo shunt.

Estudio de la característica en vacío. — Las máquinas-serie no se emplean mucho como generatrices, sino sólo para alimentar circuitos en los cuales se quiere mantener la corriente constante, cualquiera que sea la carga (sistema Thury). Sea I la intensidad constante de esta corriente; como la corriente de excitación es la misma producida en el circuito exterior, la f. e. m. de

la máquina, si la velocidad no es constante, conserva un valor invariable dado por la ordenada del punto *A* de la característica en vacío, cuya abscisa mide *I* (figura 67). Este punto *A* debe distar bastante del codo *C* para que la marcha sea estable entre límites bastante sepa-

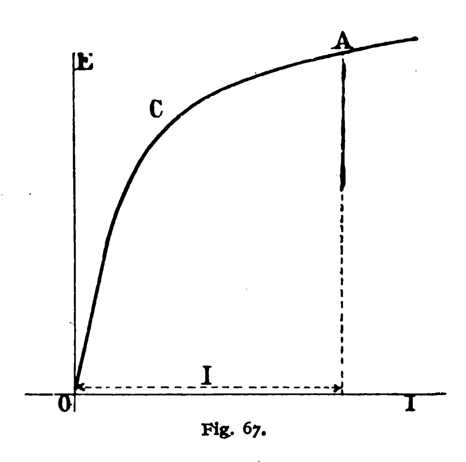


Fig. 67.

rados del valor de la tensión en los bornes y por consiguiente de la carga; por lo tanto, es preciso que para la corriente producida constante, la máquina esté muy saturada.

b) **Característica en carga.** — La dinamo está cerrada sobre un circuito en que hay un reostato de lámparas *L*, y en derivación con éste, un reostato líquido *Rl*. El montaje está dado por el esquema de la figura 68.

Se mueve la máquina con su velocidad de régimen, estando el reostato líquido fuera de circuito (para lo cual se sacan las placas del líquido) y se introducen poco a poco lámparas en el reostato *L*; intercalando lámparas se llega a un número tal, que las agujas del voltímetro y del amperímetro se desvían bruscamente;

entonces está cebada la máquina. Se siguen poniendo lámparas en el reostato *L*, y después se introducen poco a poco las láminas del reostato líquido hasta que se obtenga la corriente máxima que puede dar la má-

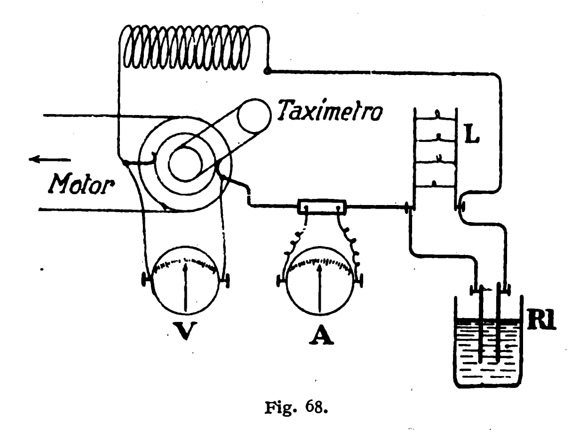


Fig. 68.

quina. Mientras dura todo el ensayo, la velocidad debe ser constante.

Se leen simultáneamente, como ya se ha dicho para la máquina shunt, la corriente producida y la diferencia de potencial en los bornes; los resultados obtenidos se resumen en un cuadro como el siguiente:

Velocidad = *N* vueltas por minuto

CORRIENTE PRODUCIDA			D. D. P. EN LOS BORNES		
Lecturas	Shunts	Amperes *I*	Lecturas	Sensibilidades	Volts *U*

La característica en carga será la curva cuyas abscisas sean los valores de I y cuyas ordenadas sean los correspondientes de u. La forma de esta curva, por las razones expuestas en el tomo 1.º, pág. 316, es la representada en la figura 69. El punto cuya abscisa mide la

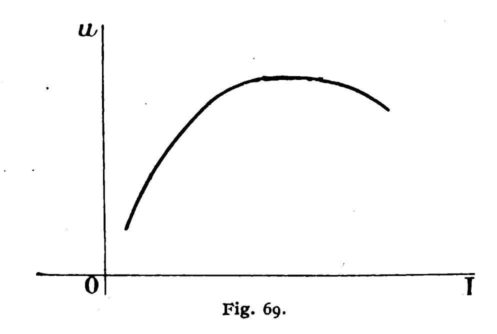


Fig. 69.

corriente que debe producir normalmente la máquina, debe estar en la parte descendente de la curva.

Cebamiento. Resistencia crítica.—Para que una dinamo serie se cebe, tiene que estar cerrada sobre una resistencia inferior a un cierto valor llamado *resistencia crítica*.

Este valor puede obtenerse al trazar la característica en carga: basta, en efecto, leer en el momento en que el número de lámparas del reostato L es bastante grande para producir el cebamiento, la intensidad de la corriente producida I_0 y la d. d. p. en los bornes U_0; la resistencia crítica tiene por valor:

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0}.$$

Esta resistencia puede también medirse sobre la característica misma. En efecto, sea I la intensidad de la corriente representada por OP cuando la resistencia exterior es R; la d. d. p. en los bornes de la máquina

está medida por la ordenada correspondiente PM, teniéndose evidentemente:

$$R = \frac{PM}{OP} \quad \text{o sea} \quad R = \text{tg } POM.$$

Por lo tanto, a medida que aumenta la resistencia R, el ángulo POM aumenta también, y el punto M se acerca al O, y la recta OM tiende a confundirse con la tangente OT a la característica; la máxima resistencia exterior, para la cual puede funcionar la máquina, tiene por valor la tangente trigonométrica del ángulo que forma la tangente en O con el eje de las I (fig. 70).

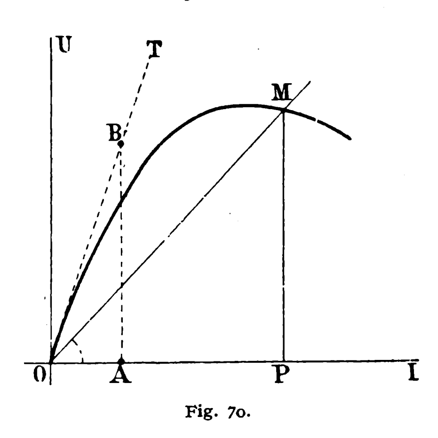


Fig. 70.

Basta tomar una longitud OA que mida, en la escala adoptada, un ampere; la ordenada correspondiente AB de la recta OT medida en la escala de los volts, dará en ohms el valor de la resistencia crítica R_0, pues se tiene:

$$R_0 = \text{tg } AOB = \frac{AB}{AO} = \frac{AB}{1} = AB.$$

OBSERVACIÓN I. — Se ve fácilmente que mientras más grande es la velocidad, mayor es la resistencia crítica; en efecto, para velocidades crecientes N_1, N_2, N_3....., las características en carga de la misma máquina serán I, II, III....., y las resistencias críticas corres-

pondientes estarán medidas por $A B_1$, $A B_2$, $A B_3$..... (véase la figura 71).

OBSERVACIÓN II.—Puede suceder que se encuentren algunas dificultades para cebar la máquina. En este caso, se empieza por revisar las conexiones, para lo cual se procede como dijimos al tratar de las dinamos shunt; después de haber arreglado las conexiones, si fuera necesario, se cierra la máquina sobre el circuito que ha de alimentar, y se unen los dos bornes con un alambre de cobre muy fino. Se mueve la máquina mediante su motor, y cuando alcanza su velocidad crítica, el alambre se funde y la dinamo queda cebada sobre el circuito principal.

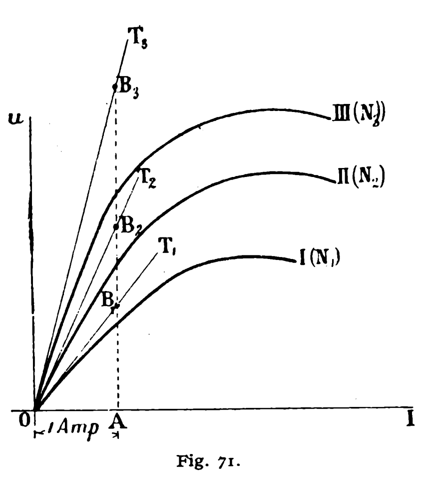


Fig. 71.

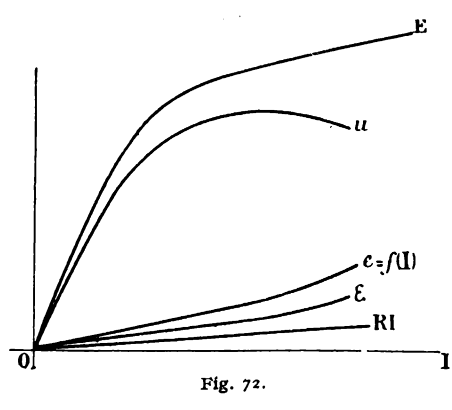


Fig. 72.

c) **Curvas de las caídas de tensión.** — Una vez trazadas la característica en vacío *E* y la característica en carga *u*, se deduce fácilmente la curva de la caída de tensión

debida a la reacción del inducido $e = f\ (I)$. Midiendo entre los bornes la suma R de las resistencias del inducido y del inductor, se puede trazar la recta $R\,I$ que representa las caídas óhmicas en el interior de la máquina; por diferencia entre las ordenadas de estas dos últimas líneas se obtiene la curva ε que representa la reacción propia del inducido (fig. 72).

d) **Regulación y cálculo del reostato de campo o regulador de inducción.** — Sea una máquina-serie destinada a mantener constantemente la intensidad I de una corriente en un circuito exterior, debiendo estar comprendida la tensión en los bornes entre un valor mínimo U_1 y uno máximo U_2. Esta máquina debe calcularse de tal modo, que cuando produzca la corriente I y no haya ninguna resistencia shuntando los inductores, dé a su velocidad de régimen N la tensión U; además, es preciso que el punto de la característica en carga, cuyas ordenadas sean I y U_2 esté en la parte descendente de esta curva (véase tomo I, pág. 316). Supongamos cumplidas estas condiciones y veamos cuál ha de ser la resistencia del regulador de inducción que ha de shuntar los inductores, para que dando siempre la máquina una intensidad I, tenga una tensión comprendida entre U_1 y U_2. Para ello se excita la máquina con un generador independiente, y mediante un reostato en serie con la excitación se busca cuál ha de ser la corriente de excitación para que la tensión sea de U volts, siendo I la intensidad de la corriente producida y la velocidad igual a la normal N; sea i su valor.

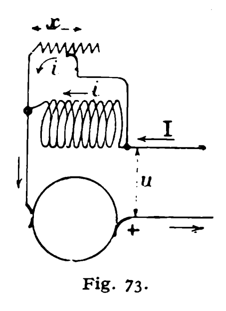


Fig. 73.

La resistencia x en derivación con la excitación ha

de ser tal que, en las condiciones indicadas, la corriente en los inductores sea i; si i' es entonces la corriente en la resistencia x (fig. 73), se tiene evidentemente:

$$I = i + i' \qquad \text{y} \qquad ri = xi';$$

siendo r la resistencia del circuito inductor; por lo tanto:

$$ri = x\,(I - i), \qquad \text{de donde} \qquad x = \frac{ri}{I - i}\,.$$

La resistencia menor del reostato debe ser

$$\frac{ri_1}{I - i_1};$$

siendo i_1 la corriente de excitación (determinada por un montaje de excitación independiente) que corresponde a las condiciones de funcionamiento I, U_1 y N.

IV. — Máquina compound

a) **Característica en vacío.** — Se traza como para una máquina shunt, estando el circuito en derivación de los inductores recorrido sólo por una corriente cuya intensidad se hace variar.

b) **Característica en carga.** —Se procede del mismo modo que para la dinamo shunt: se hace que la corriente de la dinamo pase por un reostato metálico o líquido, o por una batería de acumuladores; en este caso hay que tomar precauciones para que la fuerza electromotriz de la parte utilizada de la batería no sea nunca superior a la que desarrolla la dinamo en cuestión, para evitar los accidentes que ya sabemos (tomo I, pág. 323), por lo cual es prudente colocar en el circuito un disyuntor de mínima convenientemente regulado.

El montaje es el representado esquemáticamente en la figura 74. Como se ve en esta figura, el reostato empleado Rl es líquido.

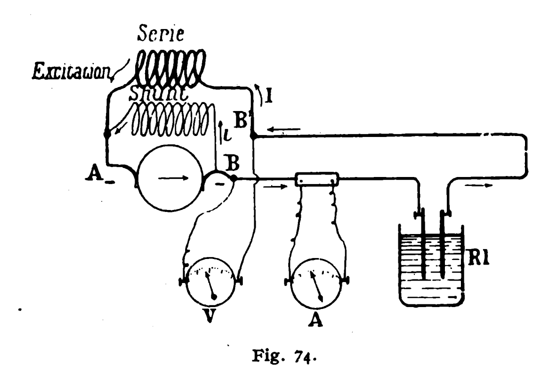


Fig. 74.

La curva obtenida $U = f(I)$ debe ser casi rectilínea y paralela al eje de las I, hasta el valor máximo para que se ha calculado la máquina (fig. 75). A partir de este valor, la curva empieza a dirigirse hacia abajo. Si

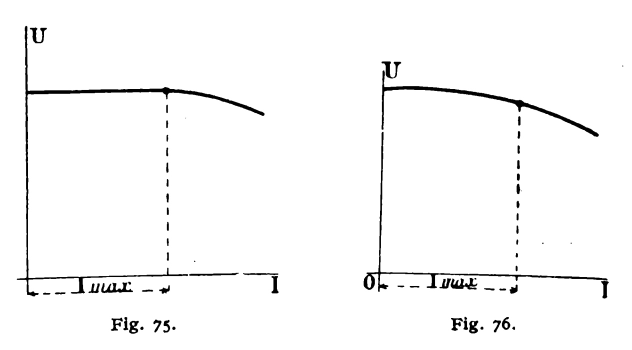


Fig. 75. Fig. 76.

se inclina antes de este valor (fig. 76) el número de espiras de la excitación serie no es suficiente. Al contrario, si resulta una curva que se eleva, la tensión en los bornes sube cuando la corriente aumenta, y la dinamo se dice que está hipercompoundada (fig. 77); se

construyen máquinas de esta clase para satisfacer ciertas condiciones especiales de funcionamiento.

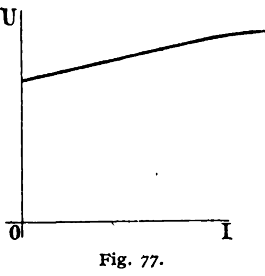


Fig. 77.

c) **Caída de tensión.** — La caída de tensión es debida a la resistencia óhmica de los circuitos shunt y serie, y a las reacciones sobre los campos inductores de los campos creados por estos dos devanados, recorrido cada uno por una corriente. Para determinarla, se procede del modo siguiente (fig. 78).

1.º Se alimenta la excitación shunt por un generador auxiliar y se traza la característica en vacío I,

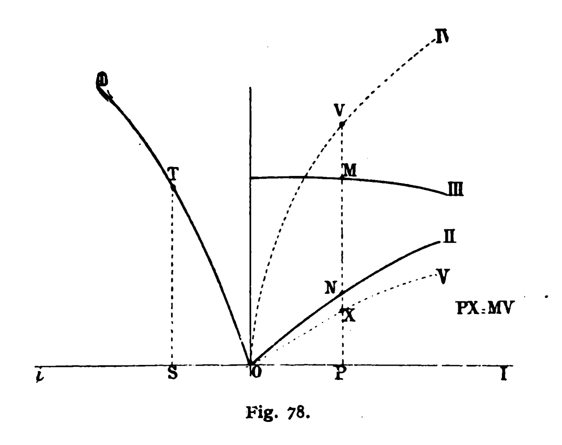


Fig. 78.

como hemos dicho anteriormente. Las abscisas son las corrientes de excitación, y las ordenadas, las f. e. m. debidas solamente a la excitación shunt;

2.º Se separa la excitación serie de las escobillas, y se emplea para la alimentación un generador auxiliar de poca f. e. m.; se traza una curva II cuyas abs-

cisas sean las corrientes en esta parte de la excitación, y las ordenadas las f. e. m. correspondientes. Es evidente que la velocidad de la dinamo se conserva constante;

3.º Se traza la característica en carga III;

4.º Se mide la resistencia R del devanado shunt y la r del devanado serie.

Sea I un valor dado de la corriente producida por la dinamo, y sea OP este valor a escala conveniente sobre el eje de las abscisas de las curvas II y III; la longitud PM mide la d. d. p. cuando la corriente producida es I, es decir, la d. d. p. u entre B y B' (fig. 74). Llamando u' a la diferencia de potencial que hay entonces entre las escobillas A y B se tiene:

$u' = Ri$ (siendo i la corriente en el devanado shunt),

$$u = u' - rI,$$

de donde

$$u = Ri - rI,$$

es decir,

$$u + rI = Ri, \qquad i = \frac{u + rI}{R}.$$

Este valor de i, calculado de este modo, llevémoslo en OS, sobre el eje de las abscisas de la curva I con la escala adoptada (fig. 78). La f. e. m. en estas condiciones de funcionamiento está medida por $PN + ST$. Si llevamos sobre la ordenada trazada por P este valor, se obtiene un punto V, y la caída de tensión estará dada por VM. Repitiendo esta construcción para varios valores de I, se puede trazar la curva IV representativa de la f. e. m. en función de la corriente producida, y la curva V que representa la caída total de tensión en función de esta misma corriente (fig. 78).

d) **Compoundar una máquina shunt.**—Supongamos que se tiene una máquina shunt y se quiere determinar

el número de espiras en serie que habría que agregar a sus piezas polares para que la dinamo quedara convenientemente compoundada, es decir, de modo que la diferencia de potencial en sus bornes permaneciese constante cuando la corriente producida pasara de cero a un valor dado I.

Supongamos trazadas: 1.º, la característica en vacío I de la máquina shunt, cuyas abscisas no son las corrientes de excitación i, sino el número de amperes-vuelta inductores npi (siendo n el número de espiras inductoras y p el de polos); 2.º, la característica en carga II de esta misma máquina (fig. 79).

Llevemos sobre el eje de las abscisas de esta última curva una longitud $O\ P$ que mida en la escala adoptada

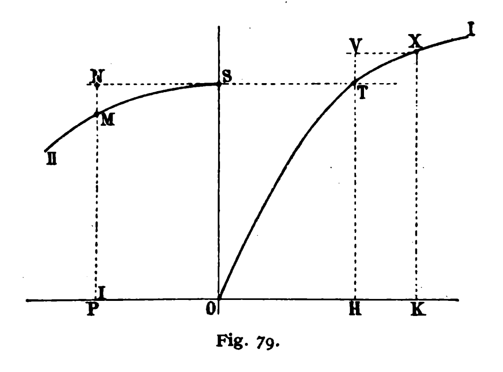


Fig. 79.

la intensidad I dada; la ordenada PM medirá la tensión U en los bornes, y NM la caída de tensión. Hay que agregar a las piezas polares un número de amperes-vuelta suficiente para que la f. e. m. de la máquina aumente en NM; para hallar este número se prolonga NS hasta que encuentre en T a la curva I, y la ordenada HT de este punto se prolonga también en una longitud $TV = MN$. La paralela trazada por V al eje de las abscisas corta a esta misma curva I en un

punto X cuya ordenada KX mide la f. e. m. que debe desarrollar la máquina, para lo cual es preciso que haya un número de amperes-vuelta medido por OK; ahora bien, por la excitación shunt se tiene ya un número OH, luego habrá que agregar a éste un número igual a la diferencia:

$$OK - OH = HK.$$

Como se quieren agregar espiras en serie, serán recorridas por la corriente dada I, y su número x debe ser tal que:

$$xI = HK, \quad \text{de donde} \quad x = \frac{HK}{I}.$$

Para conocer HK hay que conocer el número de espiras inductoras que hay en derivación en la máquina de que se trata. Este número puede calcularse con suficiente aproximación del modo siguiente: se mide en un carrete la longitud media de una espira; supongamos que esta longitud es l centímetros, siendo s mm.² la sección del alambre (fig. 80); además, se mide la resistencia de un carrete, y sea R ohms el resultado. Se tiene entonces:

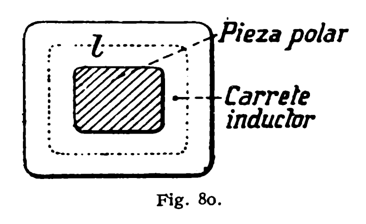


Fig. 80.

$$R = \frac{a}{10^6} \times \frac{nl}{\frac{1}{100}s};$$

donde a es la resistividad del cobre en microhms-centímetro, o sea 1,8; n es el número de espiras por carrete.

Por lo tanto:

$$R = \frac{1,8 \times nl}{10^4\, s} \quad \text{de donde} \quad n = \frac{Rs \times 10^4}{1,8\, l}.$$

Si hay p carretes, el número total de espiras será:

$$pn = \frac{pRs \times 10^4}{1,8\, l}.$$

Observación. — En la práctica se hace de modo que la máquina quede sobrecompoundada, disponiendo sobre el circuito inductor un número de espiras en serie mayor que el dado por el cálculo. Después se regula la máquina en el banco de pruebas, por medio de un shunt (véanse figuras 36 y 37).

EJERCICIOS

I. — Estudio de una dinamo shunt

1.º Medir la resistencia del inducido y la del circuito inductor.

2.º Trazar la característica en vacío y la recta de funcionamiento. Observar la posición del punto de funcionamiento sobre la característica en vacío.

3.º Trazar las características en carga, con excitación independiente, para distintos valores de la corriente de excitación.

4.º Trazar las curvas de caída de tensión: caída óhmica en el inducido, caída debida a la resistencia propiamente dicha del inducido, caída total y las curvas de reacción propiamente dicha del inducido para los diferentes valores de la excitación.

5.º Deducir de la característica en vacío y de la curva de caídas totales de tensión, la característica en carga con excitación shunt (construcción de Picou).

6.º Trazar directamente la característica en carga y comparar la curva obtenida con la dada por la construcción precedente.

II. — Funcionamiento de dos máquinas shunt en paralelo

1.º Trazar la característica en carga de la segunda máquina shunt.

2.º Acoplar después esta segunda máquina en paralelo con la primera y trazar experimentalmente la característica del grupo.

3.º Deducir esta última curva de las características de cada una de las dos dinamos y comparar las dos curvas así obtenidas.

III. — Estudio de una dinamo serie

1.º Medir la resistencia de los circuitos, inductor e inducido.

2.º Trazar la característica en vacío para la velocidad de régimen de la máquina.

3.º Trazar la característica en carga.

4.º Determinar la resistencia crítica para la velocidad de régimen, experimentalmente y por la tangente en el origen a la característica; comparar los resultados obtenidos.

5.º Trazar las curvas de caída de tensión.

6.º Calcular los valores de las resistencias del regulador de inducción que se pone en paralelo con el circuito inductor para que resulte constante la intensidad normal para diferentes valores de la tensión entre las escobillas. Comprobar experimentalmente los valores hallados.

IV. — Funcionamiento en serie de una dinamo shunt y de una dinamo serie

1.º De las características en carga, ya trazadas, de las dos máquinas, deducir la característica del grupo.

2.º Hacer el montaje antes indicado (fig. 40) y trazar experimentalmente esta última característica, que se comparará con la obtenida anteriormente.

V. — Estudio de una dinamo compound

1.° Medir las resistencias del inducido, del devanado shunt y del devanado serie.

2.° Trazar la característica en vacío.

3.° Trazar la característica en carga.

4.° Trazar las curvas de las caídas de tensión.

5.° Determinar el número de espiras del devanado shunt y calcular el número de espiras del devanado serie necesario para mantener constante la tensión cuando la corriente producida varía entre cero y un valor dado (este último valor límite se determina experimentalmente en la máquina estudiada). Comprobar si el número así hallado corresponde exactamente al de espiras que realmente hay arrolladas en la máquina.

CAPÍTULO IV

Pruebas de entrega

Cuando se encarga una dinamo a un constructor, se le imponen ciertas condiciones que debe cumplir, por lo cual es necesario poder comprobar, al recibir la máquina, si efectivamente han sido cumplidas con arreglo a lo convenido. Estas condiciones, tratándose de generadores, se refieren de ordinario a los puntos siguientes:

1.º Resistencia de aislamiento; 2.º Resistencia de los aisladores a la rotura (rigidez electrostática); 3.º Calentamiento; 4.º Sobrecarga; 5.º Autorregulación; 6.º Rendimiento.

I. **Resistencia de aislamiento.** — a) *Procedimientos de medida.* — Son los estudiados en el tomo II (pág. 89).

b) *Valores admitidos.* — Sea u la tensión normal en volts, e I amperes la corriente normal producida por la máquina, y R ohms la resistencia de aislamiento admitida como mínimo.

Según el Reglamento de la «Association des propriétaires de machines à vapeur»:

$R = 2000\ U$ si $u < 500$ volts
$R = 1$ megohm si $u > 500$ volts.

La fórmula empleada por el Instituto americano es la siguiente:

$$R = \frac{U}{I} \times 10^6.$$

Si esta fórmula da más de 1 megohm, basta con una resistencia de aislamiento de 1 megohm.

OBSERVACIÓN. — Algunos reglamentos no tratan de ensayos sobre aislamiento, sino solamente de resistencia de los aisladores a la rotura.

II. **Resistencia a la rotura.** — a) *Ensayo.* — Se aplica entre los devanados inducidos y los inductores una tensión alterna producida por un transformador y esta tensión se lleva poco a poco a su valor máximo, manteniéndola después durante cierto tiempo en este valor.

b) *Tensiones aplicadas admisibles.* — Las tensiones generalmente admitidas para las máquinas de corriente continua o alterna son las siguientes:

Tensiones aplicadas en caliente:

Hasta 5000 volts: 2 veces la tensión normal (110 mínimum); de 5000 a 10000 volts: tensión normal +5000 volts; a partir de 10000 volts: 3/2 de la tensión normal. Duración de la prueba: 1/2 hora.

Tensiones aplicadas en frío:

Hasta 5000 volts: 3 veces la tensión normal (500 mínimum); de 5000 a 10000 volts: tensión normal +10000 volts; a partir de 10000 volts: 2 veces la tensión normal. Duración de la prueba: 5 minutos.

III. **Calentamiento.** — a) *Procedimiento de medida.* — La máquina que se estudia se tiene durante algún tiempo en el local en que se ha de probar, para que adquiera la temperatura ambiente, que estará dada

por la media de las lecturas hechas en dos termómetros colocados cerca de la máquina: sea t esta temperatura.

Se mide la resistencia de los devanados inductores, y supongamos que sea r. Sobre el devanado inductor, y en diferentes puntos, se colocan los depósitos, recubiertos de algodón, de varios termómetros.

En estas condiciones se pone en marcha la máquina, y se carga con su carga normal. Al cabo de un cierto tiempo de estar funcionando, se lee la elevación de temperatura del inducido, de los inductores y de los cojinetes.

Inducido. — Se aplica contra el inducido un termómetro cuyo depósito esté cubierto con algodón, y se observa el ascenso de la columna de mercurio; la temperatura indicada se eleva durante algún tiempo, porque la superficie exterior, que mientras la máquina está funcionando está ventilada y que por consiguiente tiene una temperatura menor que la de las capas interiores, se calienta poco a poco por conductibilidad. Se anota la temperatura máxima alcanzada, y por lo tanto la elevación θ_1 de temperatura.

Inductores. — Al parar la máquina, se mide la resistencia que entonces presentan los conductores, y supongamos que sea r'; de los valores de r y r' se deduce la elevación de temperatura θ_2. En efecto, sea T la temperatura que adquieren los conductores; se sabe que:

$$r' = \frac{r(1 + 0{,}004\,T)}{1 + 0{,}004\,t}, \qquad (1)$$

siendo 0,004 el coeficiente de temperatura del cobre (tomo I, página 72).

De esta relación se deduce T, y por consiguiente se tiene:

$$\theta_2 = T - t.$$

Para obtener rápidamente los diferentes valores de la temperatura T que adquiere el circuito inductor al cabo de ciertos períodos de tiempo de funcionamiento, se procede del modo siguiente: r y t son conocidos, por lo cual basta dar a T dos valores conocidos, por ejemplo $T = 0$, y $T = 100$, calculando después los valores correspondientes de r' por medio de la fórmula anterior:

$$r'_0 = \frac{r}{1 + 0{,}004\, t} \quad \text{y} \quad r'_{100} = \frac{r \times 1{,}4}{1 + 0{,}004\, t}.$$

Sobre dos ejes de coordenadas rectangulares se determinan dos puntos; uno M de coordenadas r'_0 y 0, y el otro N de coordenadas r'_{100} y 100, y se traza la recta MN (fig. 81); hay que tomar una escala para las temperaturas y otra para las resistencias.

Cuando, en un instante dado de la prueba, se mide la resistencia de los inductores, se encuentra el valor r';

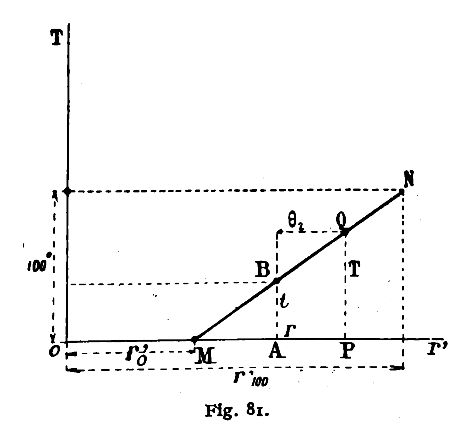


Fig. 81.

llevando en oP este valor, se obtiene como ordenada correspondiente PQ en la recta MN la temperatura T, deduciéndose fácilmente la elevación de temperatura $\theta_2 = T - t$.

La resistencia del circuito inductor se determina midiendo la intensidad I de una corriente que atraviese el circuito y la tensión u entre sus extremos (tomo II, página 106).

Observación. — El valor de r' dado por la fórmula (1) es aproximadamente igual al siguiente:

$$r' = r\,[1 + 0{,}004\,(T - t)].$$

Luego:

$$T - t = \frac{r' - r}{0{,}004\,r} \qquad \text{o sea} \qquad T - t = 250\,\frac{r' - r}{r}\,.$$

A un error del 1 % en los valores de la tensión u y de la corriente I, y por lo tanto a un error del 2 % en r y r', y a uno del 4 % en $\frac{r' - r}{r}$, corresponde un error en la elevación de temperatura $T - t$ igual a:

$$250 \times 0{,}04 = 10^{\circ}.$$

Esto nos dice que hay que proceder con gran cuidado al medir la elevación de temperatura partiendo del aumento de resistencia.

La elevación de temperatura obtenida por este procedimiento es algo mayor que la dada por los termómetros, porque éstos dan solamente la temperatura en la parte de fuera de los devanados inductores. Por esta razón hay que rebajar un poco los resultados obtenidos partiendo del aumento de resistencia.

Montaje. — Es el indicado por el esquema de la figura 82.

Una vez leída la temperatura ambiente, y cerrado el interruptor I, se abre el I' y se coloca la maneta del regulador de inducción R sobre su tope de cortocircuito A; se lee entonces en el amperímetro A_2 la

intensidad i de la corriente gastada por los acumuladores en la excitación, y sobre el voltímetro V la ten-

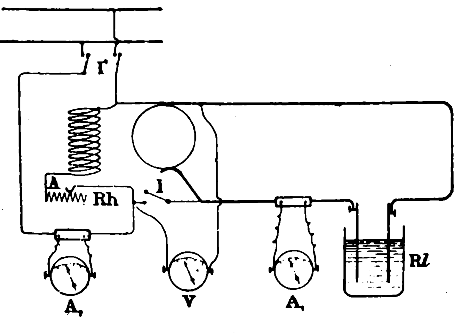


Fig. 82.

sión u entre los extremos del circuito inductor. Se tiene evidentemente:

$$r = \frac{u}{i} \cdot$$

Entonces se abre I' y se cierra I; se mueve la dinamo, y se regulan, mediante el regulador de inducción Rh y el reostato líquido Rl, la tensión y la corriente de la máquina, respectivamente dadas por el voltímetro V y el amperímetro A_1, para obtener la potencia normal. Al cabo de un cierto tiempo de estar funcionando la máquina en estas condiciones, se para, se abre I y se cierra I', y se vuelven a leer las indicaciones i' de A_2 y u' de V, la resistencia del circuito inductor será entonces:

$$r' = \frac{u'}{i'} \cdot$$

En este momento se lee la temperatura del inducido, se toma la de los cojinetes y se vuelve a poner en marcha la máquina, después de abrir I' y cerrar I.

Si la máquina está movida por un motor de corriente continua y si la tensión de la máquina puede tomar valores superiores a la que alimenta al motor, se puede operar de un modo más económico uniendo las escobillas de la dinamo a las del motor, de manera que las dos máquinas trabajen en oposición. En estas

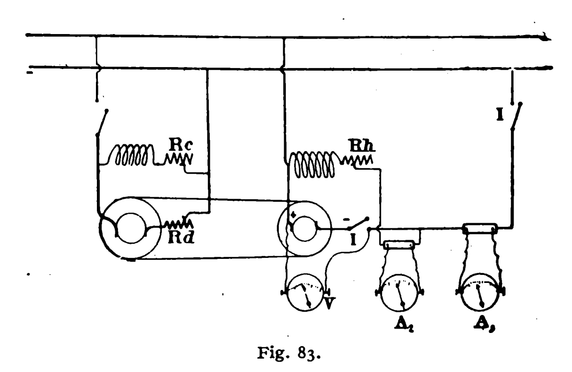


Fig. 83.

condiciones la máquina devuelve al generador la energía producida, y el generador sólo tiene que dar la parte correspondiente a las pérdidas de energía.

El montaje es el indicado por el esquema de la figura 83.

Estando abierto el interruptor *I* y cerrado el *I'*, se averigua la polaridad de las escobillas de la máquina y por medio de su regulador de inducción *Rh* se hace que la tensión resulte un poco mayor que las del generador, que es la que hay aplicada en los bornes del motor. Hay que comprobar que las dos máquinas están bien montadas en oposición, o se hace que satisfagan a esta condición.

Se disminuye poco a poco la resistencia del reostato *Rh* hasta que se obtenga la intensidad normal dada por el amperímetro A_1. La resistencia del circuito inductor se obtendrá, como ya hemos dicho, abriendo *I'*

(estando cerrado *I*) y poniendo la maneta del reostato *Rh* en el tope de cortocircuito; basta leer las indicaciones de *V* y de A_2 para deducir el valor de dicha resistencia.

Cojinetes y colector. — Para hallar la temperatura de estos órganos, basta sumergir el depósito de un termómetro en el aceite de los cojinetes, y aplicar el de otro sobre el colector, cada vez que se pare la máquina.

b) *Elevación de temperatura y duración de la prueba.* — Los valores de la elevación de temperatura y de la duración de la prueba, que pueden admitirse, varían con los distintos reglamentos. A continuación daremos los admitidos por varias asociaciones de electricistas:

«Asociación de propietarios de máquinas de vapor» (Francia):

Elevación:

Inductores, 45°; inducido, 40°; colector, 50°; cojinetes y bornes, 30°.

Duración: El coeficiente *K*, se determina del modo siguiente:

$$K = \frac{\text{volts} \times \text{amperes}}{\text{vueltas por minuto}}.$$

La duración de la prueba varía con *K* y está dada por la tabla siguiente:

K	Duración	*K*	Duración	*K*	Duración
0 a 5	2 horas	30 a 80	5 horas	500 a 800	8 horas
5 a 10	3 »	80 a 200	6 »	800 a 1500	9 »
10 a 30	4 »	200 a 500	7 »	1500 y más	10 »

La «Unión de los Sindicatos de Electricidad» (Francia) admite los siguientes valores:

Elevación:

Inductor, 60°; inducido, 50°; colector, 60°; cojinetes, 45°.

Duración:

$$K = \frac{\text{volts} \times \text{amperes}}{\text{vueltas por minuto}}.$$

K	Duración	K	Duración	K	Duración
0 a 10	2 horas	100 a 200	5 horas	500 a 700	8 horas
10 a 30	3 »	200 a 300	6 »	800 a 1000	9 »
30 a 100	4 »	300 a 500	7 »	1000 a 1500	10 »
Sobre 1500, duración fijada por un pliego de condiciones.					

Los valores fijados por el Instituto americano, son:

Elevación:

Inductor e inducido, 50°; colector y escobillas, 55°, cojinetes, 40°.

Duración: Hasta obtener una temperatura constante.

La Asociación de Electricistas alemanes da:

Elevación	devanados aislados con algodón	en movimiento	60°
		inmóviles	60°
	devanados aislados con papel	en movimiento	60°
		inmóviles	70°
	devanados aislados con mica	en movimiento	90°
		inmóviles	90°

IV. **Sobrecarga.** — a) *Ensayo.* — Después de la prueba anterior, una vez que la máquina ha alcanzado la temperatura de régimen, se sobrecarga la dinamo en un cierto valor; la máquina debe poder resistir esta sobrecarga sin deteriorarse, sin que salten chispas

perjudiciales y manteniendo su tensión de régimen a la velocidad normal.

b) *Valor y duración admisibles de la sobrecarga.* — «Asociación de propietarios de máquinas de vapor»: el 20 % de la carga normal durante $^1/_{10}$ de la duración de la prueba de calentamiento.

«Unión de Sindicatos de Electricidad»: el 20 % de la carga normal durante $^1/_{10}$ de duración de la prueba de calentamiento, y el 30 % durante 5 minutos.

«Instituto americano»: el 25 % de la carga normal durante dos horas (elevación de la temperatura sobre la de régimen: 15°).

«Asociación de Electricistas alemanes»: el 25 % durante media hora.

V. **Regulación o coeficiente de autorregulación.** — Para una máquina a potencial constante (shunt o compound), el coeficiente de regulación es el cociente que resulta de dividir la diferencia máxima que hay entre la tensión en los bornes en circuito abierto y la tensión normal en plena carga. Este coeficiente está dado en tanto por ciento de la tensión normal a toda carga.

Para una máquina de corriente constante (dinamo serie) el coeficiente de regulación es el cociente que resulta de dividir la diferencia máxima que hay entre la intensidad de la corriente (observada entre la carga máxima y el límite inferior de funcionamiento) y la intensidad a plena carga, por la intensidad normal a plena carga. Está expresado este coeficiente en tanto por ciento de la intensidad normal a plena carga.

a) *Medida.* — Sea, por ejemplo, una máquina serie. Se hace que gire con su velocidad de régimen en condiciones tales que funcione a plena carga, es decir, con su carga normal. Se mide su tensión, que es la tensión normal, y se disminuye poco a poco la carga

conservando constantes la velocidad y la resistencia del circuito de excitación.

Si en plena carga la tensión es U, y si el mayor valor que toma entre esta plena carga y la marcha de vacío es U_0, el coeficiente de regulación es:

$$\frac{U_0 - U}{U}.$$

b) *Valor admisible.* — Los reglamentos existentes para la entrega de máquinas no tratan del valor que ha de tener el coeficiente de regulación, estando éste determinado por las condiciones particulares de funcionamiento exigidas para la máquina.

OBSERVACIÓN. —Como sanción a las garantías dadas, se fijan generalmente dos límites, uno de los cuales es la tolerancia admitida para tener en cuenta las inexactitudes cometidas en las mediciones, y el otro da derecho al comprador a rechazar las máquinas.

Límites aconsejados por la «Asociación de propietarios de máquinas de vapor»:

Calentamiento sobre los límites fijados .	Tolerancia, 4° Devolución, 10°
Autorregulación	Tolerancia, 15 % del tanto % garantizado. Devolución, 40 % del íd. íd.

Límites aconsejados por el «Sindicato profesional de Industrias eléctricas»:

Calentamiento sobre los límites fijados .	Tolerancia, 3° Devolución, 10°
Autorregulación	Tolerancia, 20 % del tanto % garantizado. Devolución, 50 % del íd. íd.

EJERCICIOS

Con las diferentes máquinas de estudio, efectuar los siguientes ensayos:

1.º *Medir la resistencia de aislamiento.* —Entre los circuitos inducido e inductor y la masa, con el ohmímetro (tomo II, pág. 67) y con un voltímetro de resistencia conocida (tomo II, pág. 95).

Comprobar si las condiciones exigidas por los reglamentos citados en este capítulo quedan bien satisfechas.

Hacer primero estas medidas en frío (temperatura ambiente), y después en caliente, al acabar los ensayos de calentamiento; el aislamiento es menor en caliente.

2.º *Pruebas de calentamiento.* —Se acciona una dinamo a plena carga y con la velocidad de régimen, haciendo que su corriente pase por un reostato. A cada media hora se lee la temperatura del inducido (dada por un termómetro aplicado sobre el inducido al parar la máquina), la del colector y la de los cojinetes. Se leen las indicaciones u de un voltímetro dispuesto entre los extremos del circuito inductor, las i de un amperímetro intercalado en el circuito, al acabar cada período de funcionamiento, inmediatamente antes de pararse la máquina; de estas lecturas se deduce la resistencia del circuito inductor r' y la temperatura T.

Los resultados se resumen en una tabla como la siguiente:

Tiempo (horas)	Temperatura ambiente	INDUCTORES							INDUCIDO (Termómetro)		COLECTOR		COJINETES	
		Por termómetro		Por aumento de resistencia										
		Temperatura	Elevación	Volts	Amperes	Resistencia	Temperatura calculada	Elevación	Temperatura	Elevación	Temperatura	Elevación	Temperatura	Elevación
	t	T_1	$\theta_1 = T_1 - t$	u	i	$r' = \frac{u}{i}$	T_2	$\theta_2 = T_2 - t$	T_3	$\theta_3 = T_3 - t$	T_4	$\theta_4 = T_4 - t$	T_5	$\theta_5 = T_5 - t$
0														
1/2														
1														

Trazar las curvas cuyas abscisas sean los valores del tiempo y cuyas ordenadas sean los valores correspondientes de θ_1, θ_2, θ_3, θ_4, θ_5.

Comprobar si quedan cumplidas las condiciones exigidas por los reglamentos citados.

3.º Inmediatamente después de estas pruebas, hacer la de sobrecarga y medir las resistencias de aislamiento en caliente.

4.º Determinar el coeficiente de autorregulación.

CAPÍTULO V

Rendimiento

Se llama *rendimiento* de una dinamo a la relación entre la potencia que produce en un circuito exterior y la potencia que absorbe; se expresa en tanto por ciento de la potencia que recibe.

Consideremos una dinamo que funcione en las siguientes condiciones: diferencia de potencial entre las escobillas, U volts; corriente producida en el circuito exterior, I amperes. La potencia utilizada es $U \times I$ watts. Para mover la máquina hay que gastar una cierta potencia, W watts por ejemplo; en estas condiciones, el rendimiento es:

$$\rho = \frac{UI}{W}.$$

La potencia W puede considerarse como formada por dos partes: la potencia utilizada en el circuito exterior W_u, y la potencia W_p perdida en forma de calor (rozamientos, efectos Joule, histeresis, corrientes de Foucault), de modo que se tiene:

$$W = W_u + W_p = UI + W_p$$

y el rendimiento tendrá por valor:

$$\rho = \frac{UI}{UI + W_p}.$$

Para determinar el rendimiento, se puede medir directamente W (métodos directos), o medir W_p (métodos indirectos).

I. Métodos directos

a) **Empleo de un motor contrastado.** — Este procedimiento se aplica cuando se dispone de un motor de potencia conveniente a la dinamo y cuyo rendimiento para las distintas cargas sea conocido, teniéndose por consiguiente la curva de los rendimientos en función de las cargas.

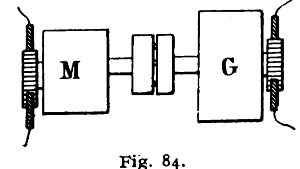


Fig. 84.

La dinamo en cuestión y el motor se acoplan directamente con una junta elástica (fig. 84); se hace que la corriente de la dinamo pase por un reostato metálico o líquido, se regula la resistencia del reostato, la corriente de excitación y la velocidad del motor para

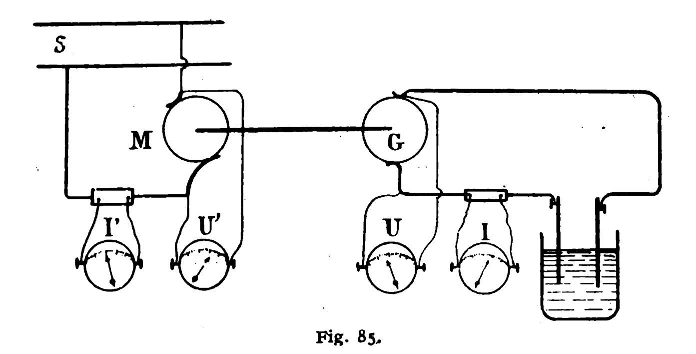


Fig. 85.

obtener las condiciones de funcionamiento a que se quiere determinar el rendimiento, que son: U volts, I amperes y N vueltas por minuto (fig. 85).

Un voltímetro y un amperímetro dan la tensión U' en los bornes del motor y la corriente I' que lo atraviesa; es evidente que la potencia tomada por este motor es $U'\ I'$ watts.

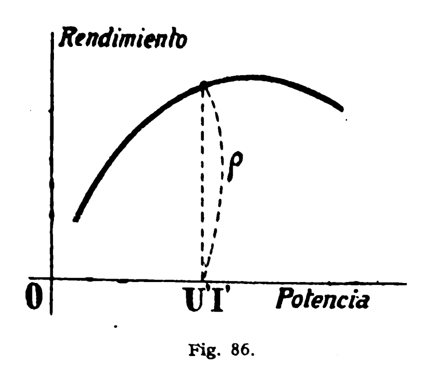


Fig. 86.

Se toma como abscisa sobre la curva de los rendimientos este valor $U'\ I'$ (figura 86) y la ordenada correspondiente da el rendimiento ρ para esta carga; la potencia transmitida por el motor y absorbida por la dinamo es:

$$W = U'I' \times \rho,$$

y el rendimiento será:

$$\frac{UI}{U'\,I'\,\rho}.$$

Si no es posible acoplar directamente las dos máquinas, se puede accionar la dinamo mediante una correa; pero en este caso hay que tener en cuenta la potencia absorbida por la correa, que puede considerarse igual al 1 ó 2 % de la potencia transmitida; además hay que comprobar que no hay deslizamiento, es decir, que la correa no patina; para ello basta colocar un taxímetro en cada máquina y ver si la relación entre las dos velocidades permanece siempre la misma mientras dura la prueba

b) **Medida del par motor aplicado a la polea de la dinamo.** *Empleo de la dinamo dinamométrica.* —

Supongamos que se pueda determinar el valor del par aplicado por el motor en la polea de la dinamo, y sea C kilográmetros este valor.

Si la máquina da N vueltas por minuto, la potencia absorbida tiene por valor (pág. 17):

$$W = \frac{C \times 2\pi N \times 9{,}81}{60} \text{ watts}$$

y el rendimiento será:

$$\rho = \frac{UI}{W}, \quad \text{de donde} \quad \rho = \frac{UI \times 60}{C \times 2\pi N \times 9{,}81}. \qquad (1)$$

El valor de C se puede determinar mediante una dinamo dinamométrica, que es una dinamo cuyo circuito inductor puede oscilar todo él sobre una corona de bolas concéntricas con el eje; sobre la armazón hay fijada una palanca en cuyo extremo lleva un platillo de balanza; diametralmente opuesto a la palanca hay un contrapeso, de manera que cuando no hay pesa alguna en el platillo, la palanca está horizontal. El árbol está acoplado con una junta elástica a la dinamo en estudio; la dinamo dinamométrica, alimentada por un generador, mueve a la dinamo de que se trata y la corona móvil de los palos tiende a ser arrastrada por el par electromagnético desarrollado entre el inducido y el inductor. En virtud del principio de la igualdad de la acción y la reacción, este par será igual al aplicado en la polea de la dinamo. Para tener el valor de este par, basta colocar pesas en el platillo de modo que la palanca vuelva a colocarse horizontalmente, y supongamos que estas pesas sumen P kilogramos. Si l es la longitud, en metros, de la palanca, es decir, la distancia al eje de la dinamo dinamométrica, del cuchillo que soporta al platillo, el par aplicado a la dinamo tendrá por valor:

$$C = Pl \text{ kilográmetros.}$$

Para determinar el rendimiento de la dinamo en condiciones determinadas de funcionamiento, se regula el regulador de inducción, la resistencia exterior por donde ha de pasar la corriente de la dinamo, y la velocidad, de modo que queden satisfechas las siguientes condiciones: voltaje en los bornes, U volts; corriente producida, I amperes; y velocidad, N vueltas por minuto.

Cuando estas condiciones están cumplidas, se hace que la palanca se coloque horizontalmente, y se deduce el rendimiento de la relación (1):

$$\rho = \frac{UI \times 60}{Pl \times 2\pi N \times 9{,}81} = \frac{UI}{PlN} \times 0{,}97.$$

II. Método indirecto: evaluación de las pérdidas de potencia

Vamos a determinar el rendimiento de una dinamo en las siguientes condiciones de funcionamiento: tensión entre las escobillas, U volts; corriente producida en el circuito exterior, I amperes; velocidad, N vueltas por minuto. El método consiste en evaluar las diferentes pérdidas de potencia que hay en la máquina: si W_p es la suma de estas pérdidas, el rendimiento es, como ya hemos dicho:

$$\rho = \frac{UI}{UI + W_p}.$$

Por darse en este método separadamente todas las pérdidas, se llama método de *las pérdidas separadas*, y es el más empleado, por ser el más sencillo, por no necesitar más que una potencia pequeña del orden de las pérdidas, por ser muy preciso, y finalmente, porque permite descubrir la causa de un rendimiento insuficiente.

Diferentes pérdidas de potencia. — Estas pérdidas son:

1.º Pérdidas por efecto Joule en el inductor y en el inducido.

2.º Pérdidas por histeresis en las planchas del inducido (tomo I, pág. 196).

3.º Pérdidas por corrientes de Foucault en el circuito inducido y en las partes conductoras que se mueven con el inducido (tomo I, pág. 230).

4.º Pérdidas por rozamientos mecánicos y por ventilación.

1.º PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE. —a) *En el inducido.* — Sea R la resistencia del inducido e i la corriente de excitación en las condiciones dadas de funcionamiento; la corriente en el inducido es $I + i$, v la pérdida de potencia por efecto Joule es

$$R\,(I + i)^2 \text{ watts.}$$

b) *En el inductor.* — Tiene por valor Ui, comprendiendo en este valor la potencia perdida en el circuito inductor y en el regulador de inducción (fig. 87).

Fig. 87.

2.º EVALUACIÓN DE LAS DEMÁS PÉRDIDAS. — Las pérdidas por histeresis y por corrientes de Foucault dependen de la inducción en el inducido y de la velocidad; las pérdidas por rozamientos y ventilación sólo dependen de la velocidad; por lo tanto, el conjunto W' de estas pérdidas es independiente de la carga de la máquina y no depende más que del flujo en el inducido y de la velocidad.

Su determinación puede hacerse del modo siguiente: Se hace girar la máquina como motor, en vacío, en

condiciones tales, que el flujo inductor Φ sea el mismo que cuando la máquina funciona como generador en las condiciones dadas, y con la misma velocidad N; la potencia que entonces hay que comunicar al motor se emplea por completo en compensar las pérdidas, ya que no produce ningún trabajo útil. Ahora bien, puesto que el flujo inductor y la velocidad son los mismos que cuando la máquina gira como generador en las condiciones dadas, las pérdidas por histeresis, por corriente de Foucault y mecánicas, son también las mismas, y se obtendrán restando de la potencia absorbida por el motor las pérdidas por efecto Joule en esta máquina cuando gira como motor.

La fuerza electromotriz desarrollada por la máquina, girando como generador es:

$$E = \frac{Nn\Phi}{10^8},$$

siendo n el número de espiras inducidas. Cuando gira como motor, la fuerza contraelectromotriz desarrollada es también:

$$E' = \frac{Nn\Phi}{10^8}.$$

Por consiguiente, tendremos el mismo flujo Φ si la fuerza contraelectromotriz E' es igual a la fuerza electromotriz E. Como U es la diferencia del potencial aplicada en los bornes del generador, se tiene:

$$E = U + RI,$$

donde R es la resistencia del inducido.

Si se aplica a los bornes de la máquina, girando como motor de vacío, una diferencia de potencial U , es recorrida por una corriente I_0, y se tiene:

$$U' = E' + RI_0.$$

Si se quiere que los flujos sean iguales en los dos funcionamientos, es preciso que $E = E'$, es decir, que se tenga:

$$U' = U + RI + RI_0.$$

Despreciando el término RI_0, por ser muy pequeños R e I_0, resulta:

$$U' = U + RI.$$

Por lo tanto, para evaluar las pérdidas por histeresis, corrientes de Foucault y mecánicas, se monta

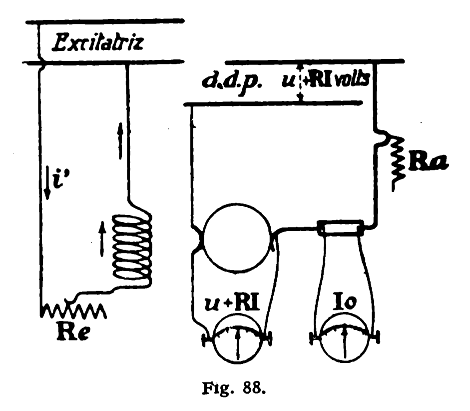


Fig. 88.

la máquina con excitación independiente, poniendo un reostato en serie con la excitación, y se aplica en los bornes del inducido una diferencia de potencial igual a $U + RI$, regulando con el reostato *Re* la corriente de excitación para que la velocidad sea N (fig. 87).

La corriente I_0 la da un amperímetro dispuesto en el circuito que alimenta al motor. La potencia absorbida:

$$(U + RI)\, I_0,$$

representa la potencia perdida por efecto Joule en el

inducido (RI_0^2) y las pérdidas buscadas W', luego se tiene:

$$(U + RI)\, I_0 = RI_0^2 + W',$$

de donde

$$W' = (U + RI)\, I_0 - RI_0^2,$$

y por consiguiente:

$$W_p = R\,(I + i)^2 + ui + (u + RI)\, I_0 - RI_0^2.$$

Observación I. — En serie con el inducido hay colocado un reostato de arranque Ra; cuando el motor ha arrancado, se le pone en cortocircuito, y se regula el regulador de inducción Re de modo que se obtenga la velocidad N.

Observación II. — Se puede dejar la máquina con excitación shunt; pero entonces se regula la tensión aplicada de modo que el voltaje indicado por un voltímetro derivado entre las escobillas sea $U + RI$, y el amperímetro que da I_0 está dispuesto para ser atravesado por la corriente que circula por el inducido (fig. 89).

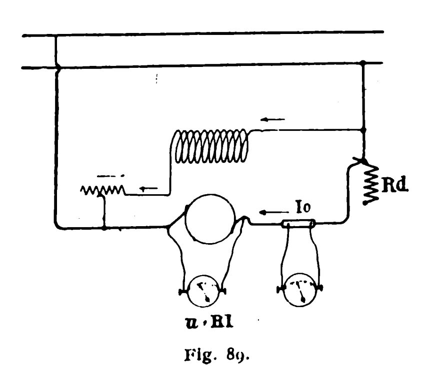


Fig. 89.

Observación III. —Frecuentemente, en la práctica industrial, se aplica una tensión tal, que la diferencia de potencial entre las escobillas no es $U + RI$, sino solamente U; la corriente I_0 tomada por el motor en vacío tiene aproximadamente el mismo valor en los dos casos.

OBSERVACIÓN IV. — Del conocimiento de la potencia W' gastada por la máquina funcionando como motor de vacío en las condiciones ya indicadas, de los trazados de la característica en vacío y de la curva de reacción total del inducido, a la velocidad dada N, se puede deducir el rendimiento en condiciones determinadas de la generatriz.

Basta para ello ver cuál es en estas condiciones la corriente de excitación. Sea I la característica en

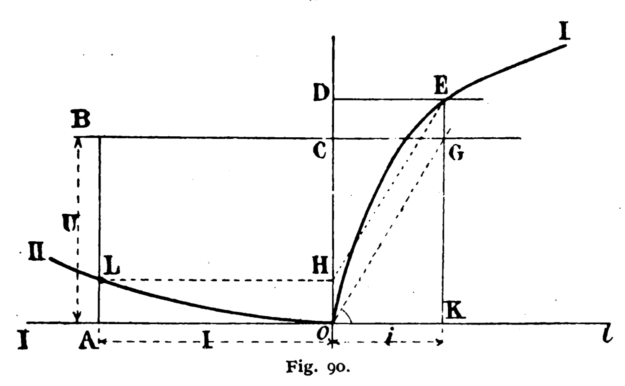


Fig. 90.

vacío, y II la curva de reacción total del inducido (figura 90). Se toma OA igual a la corriente dada I; por A se levanta la perpendicular a $O A$, y sobre esa perpendicular se toma $AB = U$, que es la tensión dada; por el punto B se traza una paralela $O A$ que cortará al eje de las ordenadas en C, y se toma $C D = A L$, que es la caída de tensión correspondiente a la corriente I; la paralela a $O A$ trazada por D corta a la característica en vacío en un punto E, cuya abscisa $O K$ mide, en la escala de que se trate, la corriente i de excitación, que es lo que se quiere hallar.

De este modo se conocen todos los términos del segundo miembro de la siguiente igualdad:

$$W_p = R(I + i)^2 + Ui + W'$$

y el rendimiento será:

$$\rho = \frac{UI}{UI + R(I + i)^2 + Ui + W'}.$$

La resistencia total (inductor y regulador de inducción intercalado para obtener las condiciones dadas de funcionamiento) está medida por la tangente trigonométrica del ángulo KOG. La construcción anterior se deduce fácilmente de la de Picou (pág. 65).

Si la curva de reacción del inducido se ha trazado admitiendo que la caída de tensión es el doble de la caída óhmica, se ve que por este procedimiento se puede determinar el rendimiento sin cargar la máquina, aunque es evidente que entonces no se puede aspirar a una gran aproximación en los resultados.

Separación de las pérdidas por histeresis y corrientes de Foucault, de las pérdidas mecánicas, frotamientos y ventilación. *Primer procedimiento.* —El gasto de potencia que hace la máquina funcionando como motor de vacío, da el total de pérdidas W', y ahora se trata de determinar el valor de cada una de éstas, a saber, de las pérdidas mecánicas W_1 y de las pérdidas W_2 por histeresis y por corrientes de Foucault ($W' = W_1 + W_2$). Para ello se mueve la dinamo por un motor, que puede ser de poca potencia, primero en vacío, sin excitación y a la velocidad N. Sean U e I la tensión en los bornes y la corriente absorbida. La potencia tomada por el motor es UI watts, y la potencia transmitida a la dinamo es:

$$UI - rI^2 - w;$$

donde r es la resistencia del motor, y w la suma de las pérdidas en este motor por efecto Joule en el inductor, por histeresis, por corrientes de Foucault, por

frotamiento, ventilación y transmisión. Esta potencia mide evidentemente la pérdida de potencia W_1 en la dinamo por frotamiento y por ventilación:

$$UI - rI^2 - w = W_1. \qquad (1)$$

Se excita después la dinamo por la misma corriente que para la carga a que se quiere determinar el rendimiento y se hace que gire con la misma velocidad N. La corriente tomada por el motor es I' y la potencia transmitida a la dinamo es $UI' - rI'^2 - w$, ya que las pérdidas w son las mismas aproximadamente.

Esta potencia, que mide la suma de las pérdidas en la dinamo por ventilación y rozamientos, por histeresis y corrientes de Foucault, tiene el valor W' medido anteriormente. Por lo tanto, se tiene:

$$UI' - rI'^2 - w = W' \qquad (2)$$

y restando ordenadamente la igualdad (1) de la (2) resulta:

$$U(I' - I) - r(I'^2 - I^2) = W' - W_1.$$

Se conocen los valores de U, I, I', r, luego se puede calcular el primer miembro de esta igualdad, que dará las pérdidas por histeresis y corrientes de Foucault, por ser $W_2 = W' - W_1$. De aquí se puede deducir fácilmente el valor de las pérdidas mecánicas W_1.

Segundo procedimiento. — Si fuera posible que este motor girara con su velocidad de régimen sin ningún flujo inductor, no habría pérdidas por histeresis ni por corrientes de Foucault, y la potencia tomada por el motor en vacío sería igual a las pérdidas de potencia por rozamientos y ventilación. Es evidente que no hay posibilidad de conseguir el funcionamiento de un motor en estas condiciones, pero se puede hacer disminuir poco a poco la corriente de

excitación buscando para cada uno de sus valores la tensión que aplicada a los bornes de la máquina hace que ésta gire con su velocidad de régimen N. Sea U_1 la tensión en los bornes e I_1 la corriente en el inducido, correspondientes a un cierto valor i_1 de la corriente de excitación; la potencia absorbida por la máquina es $U_1\ I_1$ y la suma de las pérdidas por histeresis y corrientes de Foucault y mecánicas es en estas condiciones:

$$U_1 I_1 - R I_1^2.$$

Tracemos una curva que tenga por abscisas los diferentes valores de i_1, y por ordenadas los correspondientes de $U_1\ I_1 - R\ I_1^2$, cuya forma será tal como $A\ B$ (fig. 91); prolongando esta curva hasta que corte en M al eje de las ordenadas se tendrá, medida por OM, la potencia perdida cuando la corriente de excitación es cero, es decir, las pérdidas mecánicas W_1. Las pérdidas por histeresis y por corrientes de Foucault tendrán entonces por valor:

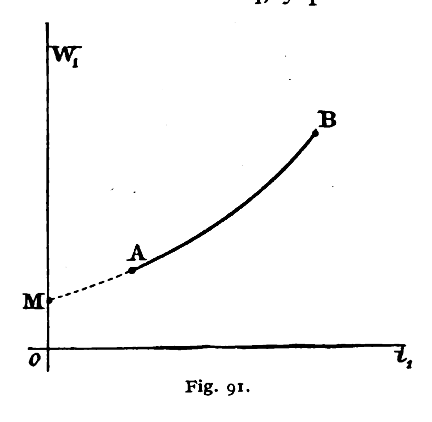


Fig. 91.

$$W_2 = W' - W_1.$$

Tercer procedimiento. — Se pone en marcha el motor a una velocidad mucho mayor que la de régimen, y se anota esta velocidad; después se corta de pronto la corriente que lo alimenta, así como la corriente de excitación, con lo cual la máquina pierde cada vez

más velocidad. Anotando a intervalos regulares la velocidad de la máquina, se construye una curva cuyas abscisas son estos intervalos de tiempo y cuyas ordenadas son las velocidades correspondientes. Sea *A B* esta curva (figura 92); por el punto *M*, cuya ordenada mide la velocidad de régimen, se traza la tangente *MT* a la curva, y por *M* la perpendicular a *MT* que cortará al eje de las abscisas en *S*. Se demuestra fácilmente que la proyección *P S* de *M S* sobre este eje es proporcional a las pérdidas mecánicas W_1; por consiguiente, se tiene:

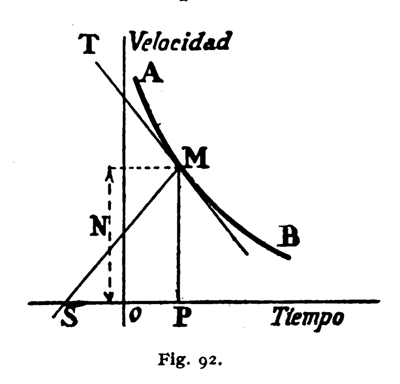


Fig. 92.

$$W_1 = K \times PS. \qquad (1)$$

Como se ve, es preciso determinar la constante *K*; para ello se hace que por el circuito inductor pase la corriente *i* a que correspondía la velocidad de régimen *N* (página 115) en vacío al hallar la suma de las pérdidas de potencia *W'* por histeresis, corrientes de Foucault, frotamiento y ventilación. En los bornes del inducido se aplica una tensión tal, que la velocidad sea aún mayor que *N*, y se corta de pronto la corriente

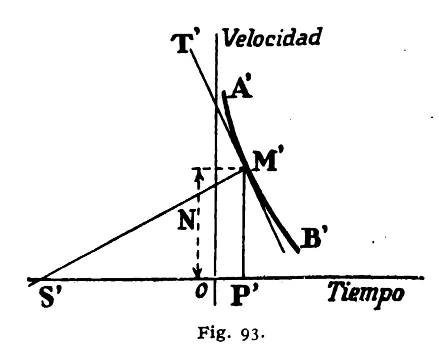


Fig. 93.

en el inducido, dejando la corriente inductora sin cortar; en estas condiciones, el motor pierde velocidad, la cual se va anotando de tiempo en tiempo. Se traza otra curva $A'\ B'$ cuyas abscisas sean estos intervalos de tiempo, y cuyas ordenadas sean las velocidades correspondientes (fig. 93), y sea M el punto de esta curva cuya ordenada mide la velocidad de régimen N; repitiendo la misma construcción indicada para la curva AB de la figura anterior, se tiene que la longitud $P'\ S'$ es proporcional a la suma de las pérdidas de potencia W', y el factor de proporcionalidad es el mismo que anteriormente, es decir, K, de modo que resulta:

$$W = K \times P'S';$$

como $P'\ S'$ y W' se conocen, se deduce el valor de K, que es:

$$K = \frac{W'}{P'S'}$$

y sustituyendo este valor en (1), se tiene:

$$W_1 = \frac{PS}{P'S'} \times W'.$$

Las pérdidas por histeresis y por corrientes de Foucault tienen por valor:

$$W_2 = W' - W_1.$$

Cuando se trata de máquinas pequeñas, para medir la velocidad sin agregar un par resistente a la máquina, se unen las escobillas de ésta a los bornes de un voltímetro; en el trazado de la primera curva $A\ B$ el flujo es constante y debido al magnetismo remanente, luego la velocidad es proporcional a la fuerza electromotriz desarrollada, dada por el voltímetro.

Por ser pequeña esta fuerza electromotriz, se em-

plea un voltímetro para poco voltaje. Cuando el motor está todavía moviéndose se mide con el taxímetro la velocidad y se lee la indicación del voltímetro para determinar la relación entre la fuerza electromotriz desarrollada y la velocidad (pág. 28).

En el trazado de $A' B'$, también el flujo se mantiene constante, por serlo la corriente de excitación i, por lo cual se procede del mismo modo que para $A B$; pero como la fuerza electromotriz desarrollada es mucho mayor en este caso, el voltímetro debe ser de distinta sensibilidad o alcance. Este método se debe a Routin.

Observación I. — Claro está que la pendiente de la primera curva es más pronunciada que la de la segunda, porque el par resistente no es tan considerable, y por lo tanto la pérdida de velocidad no es tan grande a igualdad de tiempo; la longitud PS es evidentemente menor que la $P' S'$.

Observación II. — La manera de hacer esta prueba es bastante delicada. Un operador observa el cronómetro y hace una señal a intervalos iguales, mientras que otro operador observa el voltímetro y anota las indicaciones correspondientes a cada señal. Los intervalos dependen de la masa de la parte móvil de la máquina: mientras menor es el momento de inercia, más pronto se para la máquina, de modo que para las máquinas pequeñas hay que leer las velocidades a cada cinco segundos aproximadamente, cuando la máquina no está excitada, y cada tres segundos cuando lo está.

EJEMPLO

Supongamos que se trata de determinar el rendimiento de la dinamo antes estudiada en las siguientes condiciones de funcionamiento: tensión en los bornes, 110 volts;

corriente producida, 17 amperes; velocidad, 1950 vueltas. En las curvas de la figura 66 se ve que en estas condiciones la corriente de excitación es 0,61.

Corriente en el inducido: $17 + 0{,}61 = 17{,}61$ amperes;

Pérdida por efecto Joule en el inducido:

$$0{,}4 \times 17{,}61^2 = 124 \text{ watts.}$$

Pérdida por efecto Joule en el inductor:

$$110 \times 0{,}61 = 67 \text{ watts.}$$

La máquina está alimentada como motor girando de vacío.

Tensión aplicada entre las escobillas:

$$110 + 0{,}4 \times 17{,}71 = 117 \text{ volts.}$$

La corriente tomada por el motor, en el inducido, es de 1,1 ampere.

Por consiguiente:

Las pérdidas por histeresis, por corrientes de Foucault, por frotamiento y ventilación, son:

$$117 \times 1{,}1 - 0{,}4 \times 1{,}1^2 = 128 \text{ watts.}$$

Suma de las pérdidas:

$$124 + 67 + 128 = 319.$$

Rendimiento:

$$\frac{110 \times 17}{110 \times 17 + 319} = \frac{1870}{2189} = 0{,}85, \text{ es decir, el } 85\ \%.$$

Procediendo del mismo modo pero con distintas cargas, se encuentra para 110 volts y 10 amperes, el 79 %; y para 111 volts y 5 amperes, el 70 %.

CAPÍTULO VI

Comprobación experimental de las propiedades de los motores de corriente continua

I. **Sentido de rotación.**—a) La dinamo está excitada por un generador de tensión conveniente *S*, o movida por un motor; se observa su sentido de rotación *F* y se ve cuál es la polaridad de las escobillas; sea por ejemplo *A* el polo + y *B* el — (figura 94), con lo cual se sabe el sentido de la corriente que la dinamo tiende a producir en un circuito exterior, y por lo tanto el sentido de la corriente que atraviesa el inducido, es decir, de *B* a *A*. Una vez hecho esto, se separa la máquina del motor, dejando la corriente en la excitación, y se une la escobilla *B* con el polo positivo de un generador *S'* a través de un reostato *Rh*, y la escobilla *A* con el polo negativo de este mismo generador (fig. 95). En estas condiciones, el sentido de la

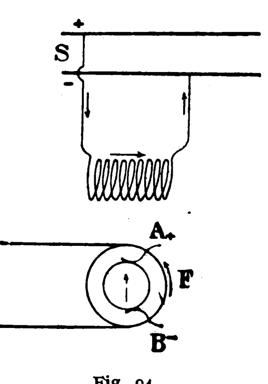


Fig. 94.

corriente en el inducido es el mismo que cuando la máquina estaba movida por el motor, siendo también

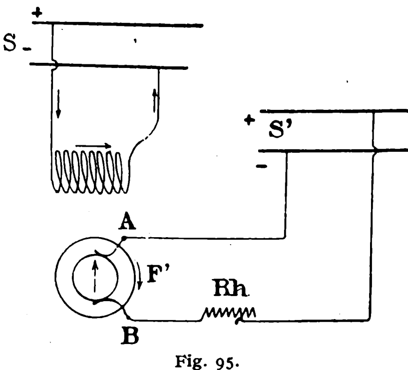


Fig. 95.

el mismo el sentido del flujo inductor. Se ve que la máquina gira como motor en el sentido *F'* inverso de *F*.

b) *Invirtiendo el sentido de la corriente en el inductor o en el inducido, cambia el sentido de rotación.* — Para comprobarlo, se coloca en el circuito inductor un inversor I_1, y en el inducido otro I_2 (fig. 96).

Estando el inversor I_1 en la posición *A B* y el I_2 en la *C D*, el motor gira en un cierto sentido *F*; si se pone I_1 en la posición *A' B'*, cambia el sentido de rotación del motor; si estando I_1 en esta posición, se pone I_2 en la posición *C' D'*, vuelve a invertirse el sentido de rotación. Por lo tanto, se ve que cambiando al mismo tiempo el sentido de la corriente en el inductor y en el inducido, el sentido *F* de la rotación no varía.

c) *Un motor shunt o serie sólo tiene un sentido de rotación posible, no variando las conexiones entre el inductor y el inducido.* — Se comprueba esto colocando entre los conductores que unen el generador con el motor, un inversor; viéndose que aunque se cambie el sentido de la corriente, el motor conserva el mismo sentido de rotación.

Es fácil ver que el sentido es el mismo en que habría que hacer girar la máquina como generador para que se cebara, si es shunt, y en sentido contrario, si es de excitación en serie.

Para cambiar el sentido de rotación, basta invertir

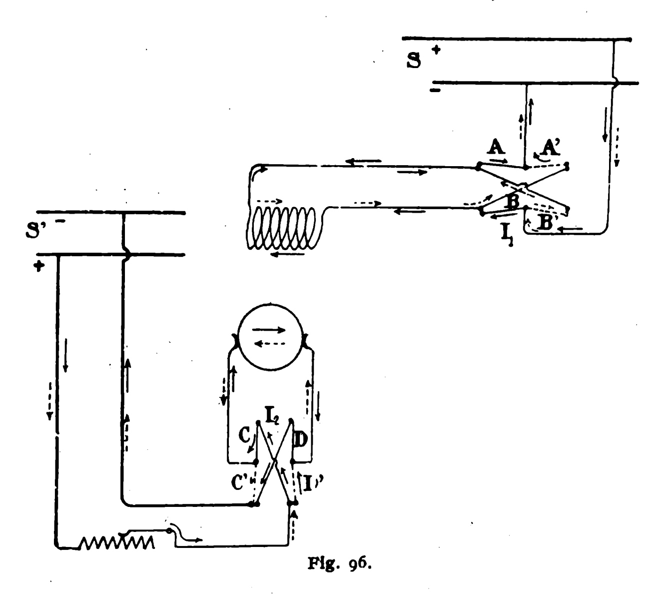


Fig. 96.

la corriente en el inductor o en el inducido, es decir, modificar las conexiones entre inducido e inductor.

II. Fuerza contraelectromotriz. — a) *Modo de comprobar la existencia de esta fuerza electromotriz.* — Se excita el motor por un generador independiente *S* y las escobillas se unen a los bornes de otro generador *S'* a través de un reostato *Rh* y de un interruptor *A*, colocando además un amperímetro en el circuito del inducido y un voltímetro entre las escobillas (fig. 97).

Se sujeta la polea del motor para que no pueda girar y se cierra el interruptor *A*, viéndose que el amperí-

metro indica una corriente I y el voltímetro una cierta tensión U. Si R es la resistencia del inducido, medida de antemano, se comprueba que:

$$U = R \times I.$$

Como R es muy pequeña, y como además, por medio del reostato Rh no se deja llegar a la máquina más que una corriente de pocos amperes, el producto RI, y por consiguiente, el voltaje en los bornes del motor, tiene un valor muy poco elevado.

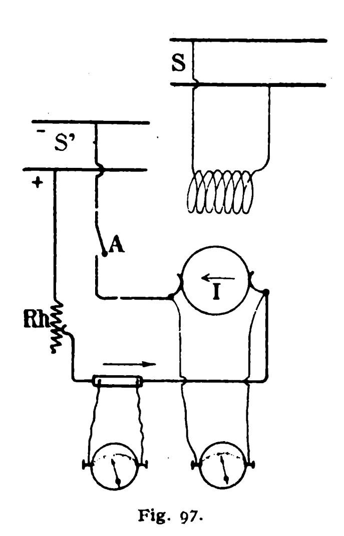


Fig. 97.

Después se suelta la polea, con lo cual el motor empezará a girar, viéndose que el voltaje U sube, al mismo tiempo que la corriente I baja. Esto demuestra que por efecto de la rotación se ha originado una fuerza electromotriz en el inducido, de sentido opuesto a la tensión aplicada, llamándosele fuerza contraelectromotriz desarrollada por el motor.

b) *Valor de la fuerza contraelectromotriz.* — Sea U la diferencia de potencial entre los bornes del motor, e I la corriente en el inducido; se sabe que la fuerza contraelectromotriz tiene por valor:

$$E = U - RI,$$

donde R es la resistencia del inducido; y puesto que R es conocida, se puede deducir fácilmente el valor de E.

La fuerza contraelectromotriz es proporcional a la

velocidad, si el flujo inductor es constante. Para demostrarlo, se mide con el taxímetro la velocidad para una corriente dada de excitación y para una corriente I también determinada; sea esta velocidad de N vueltas por minuto y E la fuerza contraelectromotriz calculada como acabamos de decir. Se deja la misma corriente inductora, y por medio del reostato Rh se aumenta la corriente en el inducido, hasta que tenga, por ejemplo, el valor I'; la velocidad del motor aumenta y se mide su nuevo valor N' con el taxímetro. El voltímetro da también una nueva tensión U', con lo cual se puede determinar la nueva fuerza contraelectromotriz, que será:

$$E' = U' - RI'.$$

Conociendo estos valores E y E', se ve que son proporcionales a N y N', es decir, que se verifica la siguiente igualdad:

$$\frac{E}{E'} = \frac{N}{N'}, \quad \text{o sea} \quad E' = E\frac{N'}{N}.$$

Si la velocidad es constante, la fuerza contraelectromotriz es proporcional al flujo. Nos limitaremos a demostrar que aumenta si el flujo aumenta, para lo cual se mide de antemano la velocidad N para una corriente de excitación i y una corriente I en el inducido. Como ya sabemos, se tiene:

$$E = U - RI.$$

Una vez calculado este valor, se toma otro valor i' para la corriente de excitación, y se hace variar la corriente en el inducido hasta que se tenga la misma velocidad N que antes.

Sea en estas condiciones U' la tensión en los bor-

nes e I' la intensidad de la corriente; la nueva fuerza contraelectromotriz será:

$$E' = U' - RI'.$$

Hallados estos valores de E y E', se ve que si i' es mayor que i, E' es también más grande que E.

III. Velocidad de un motor. — La velocidad de un motor tiene por valor (tomo I, pág. 343):

$$N = \frac{(U - RI)\,10^8}{n\Phi} \text{ vueltas por segundo.}$$

Por consiguiente:

a) *Es proporcional a la fuerza contraelectromotriz, si el flujo es constante.* — *Comprobación.* Se hace el mismo montaje de la figura 97, y sin cambiar el valor de la corriente de excitación, se aplican sucesivamente a los bornes del inducido las tensiones U, U', U''... midiéndose las corrientes I, I', I''... en el inducido y las velocidades N, N', N''... correspondientes a cada tensión. De este modo se comprueba que se verifican las siguientes igualdades:

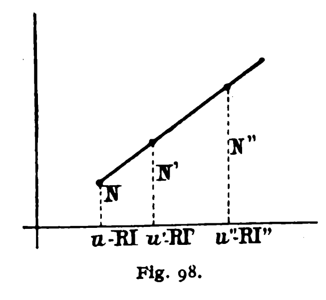


Fig. 98.

$$\frac{U - RI}{N} = \frac{U' - RI'}{N'} = \frac{U'' - RI''}{N''} = \cdots$$

Gráficamente se puede comprobar esta propiedad, tomando como abscisas los valores de $U - RI$ y como ordenadas los correspondientes de N, viéndose que los puntos resultantes están en línea recta (fig. 98).

b) *Es inversamente proporcional al flujo, si la fuerza contraelectromotriz es constante.* — Basta limitarse a probar que la velocidad aumenta o disminuye si el flujo inductor, y por consiguiente, si la corriente inductora disminuye o aumenta, para lo cual se hacen pasar por el inductor sucesivamente corrientes cada vez mayores, por ejemplo, tales como i, i', i''... y se aplican tensiones U, U' U''... tales, que si I, I', I''... son las corrientes en el inducido, se tenga:

$$U - RI = U' - RI' = U'' - RI'' = ...$$

y se miden las velocidades N, N', N''... que toma el motor, comprobando que estas velocidades son cada vez menores.

En realidad, como los valores RI, RI', RI'' difieren muy poco unos de otros y son tan pequeños, bastará aplicar a los bornes del inducido una misma tensión U, y hacer pasar sucesivamente por el inductor corrientes cada vez mayores i, i', i''... midiendo las velocidades correspondientes N, N', N''... resultando que estas velocidades son decrecientes, como se quería demostrar.

IV. Corriente tomada por un motor. — a) *Corriente de arranque.* — Al comprobar la existencia de la fuerza contraelectromotriz, se ha visto que la corriente de arranque es mucho mayor que la que toma el motor durante su marcha (pág. 129). Además se ve que a medida que se disminuye la resistencia del reostato Rh (figura 97), la corriente aumenta de pronto antes de aumentar la velocidad, disminuyendo en cuanto se acelera la velocidad.

b) *Corriente durante la marcha.* — Para una misma velocidad y una misma tensión aplicada entre las escobillas, esta corriente es tanto mayor cuanto más grande es el par resistente.

Esto se puede comprobar del modo siguiente: el motor está unido a una dinamo shunt, cuya corriente se hace circular por un circuito constituído por lámparas o por un reostato. Se acciona primero la dinamo en vacío, con el circuito abierto, anotando la velocidad dada por el taxímetro T y la corriente I tomada por el motor, indicada por el amperímetro A_1 (fig. 99). Se

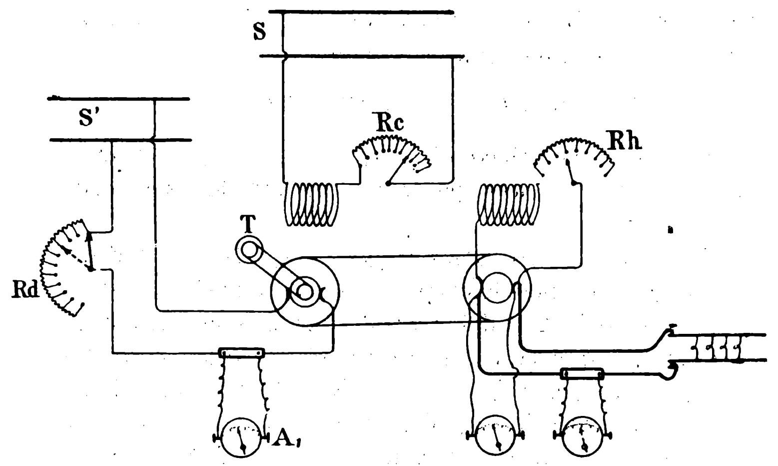


Fig. 99 (*Rd*, reostato de arranque; *Rh*, reostato de la dinamo).

cierra después el circuito de la dinamo sobre algunas lámparas; mediante el reostato Rc del motor se mantiene la velocidad con el mismo valor que cuando marchaba de vacío, y se anota la corriente I_1 dada por A_1. Si se aumenta poco a poco la potencia $U' \; I'$ de la dinamo (U' está dada por el voltímetro, e I' por el amperímetro, ambos dispuestos en el circuito de la dinamo), el par resistente aumenta también, y se comprueba, como anteriormente, que la corriente tomada por el motor aumenta al mismo tiempo.

V. Par motor.— a) *Medida del par motor.* —Supongamos que se quiera determinar el par desarrollado en

la polea del motor cuando éste funciona en las siguientes condiciones: tensión aplicada entre los bornes, U volts; corriente en el inducido, I velocidad; N vueltas por minuto.

Sobre la polea de la máquina se dispone un freno y se unen las escobillas a un generador que pueda dar, cualquiera que sea la corriente producida, una tensión U volts (una batería de acumuladores, por ejemplo), a través de un reostato de arranque R_d. Una vez en marcha el motor, y el reostato de arranque fuera de circuito, se aprieta poco a poco el freno sobre la polea hasta que se obtenga la corriente I; al mismo tiempo se regula la velocidad a N vueltas por medio del regulador de inducción R_c y se mantiene horizontal el brazo del freno colocando pesas en el platillo P (fig. 100). Sea P kilogramos el peso colocado en el platillo; estando cumplidas todas estas condiciones, el par C desarrollado sobre la polea tendrá por valor:

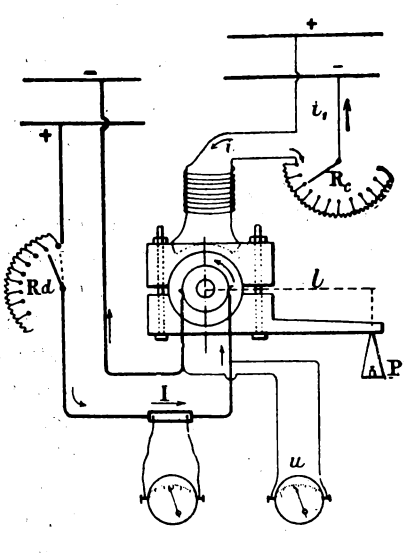


Fig. 100.

$$P \times l \text{ kilográmetros}$$

siendo l la distancia expresada en metros entre el punto de suspensión del platillo y la vertical que pasa por el

centro de la polea. Expresando este par en joules, se tiene:

$$C = P \times l \times 9{,}81 \text{ joules.}$$

Si P está expresado en gramos y l en centímetros, se tiene:

$$C = \frac{P \times l \times 9{,}81}{10^5} \text{ joules.}$$

Pero sabemos que este par tiene por valor:

$$C = \frac{n\Phi I}{2\pi \times 10^8} \text{ joules.}$$

Por consiguiente:

b) *El par motor es proporcional a la corriente I, cuando el flujo Φ es constante.* — *Comprobación.* — Se mantiene constante la corriente de excitación i; se aplica en los bornes del inducido una tensión conveniente; se regula la presión del freno, y cuando se establece el equilibrio, se mide la corriente I y el par resistente. Se aumenta poco a poco la presión del freno de modo que se obtengan corrientes I_1, I_2, I_3... Los pares medidos tienen entonces los valores C_1, C_2, C_3, y se verifica que:

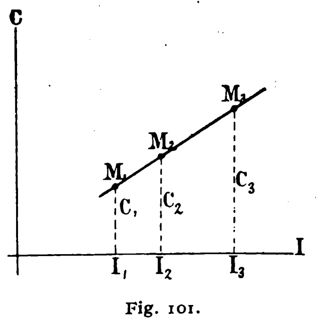


Fig. 101.

$$\frac{C_1}{I_1} = \frac{C_2}{I_2} = \frac{C_3}{I_3} = \ldots..$$

Tomando como abscisas los valores de las corrientes I_1, I_2, I_3... y como ordenadas los correspondientes valores de los pares, se debe obtener una serie de puntos M_1, M_2, M_3... en línea recta (fig. 101).

c) *El par motor es proporcional al flujo* Φ *cuando la corriente* I *es constante.* — *Comprobación.* Limitándonos a probar que el par aumenta o disminuye al mismo tiempo que la corriente de excitación i si la corriente I permanece constante, basta tomar valores sucesivos de la corriente de excitación, tales como i_1, i_2, i_3,... regulando el freno para que la corriente I no varíe; se determina el valor del par para cada valor de i, viéndose que estos valores C_1, C_2, C_3... crecen si i_1, i_2, i_3... son también crecientes.

VI. Desvío de las escobillas. — a) *Las escobillas deben estar por detrás de la línea neutra.* — Colocando las escobillas *delante* de la línea neutra y haciendo girar el motor de vacío, se producen chispas muy fuertes, tanto más cuanto mayor sea el desvío de las escobillas. Estas chispas desaparecen acercando las escobillas a la línea neutra, y generalmente es preciso pasar de esta línea.

b) *El par motor disminuye cuando aumenta el desvío de las escobillas por detrás de la línea neutra.* — Esto se comprueba disponiendo un freno sobre la polea (fig. 100), y midiendo, como antes, los pares motores para una misma corriente I y un mismo flujo Φ; para distintos ángulos de desvío de las escobillas, se comprueba que en estas condiciones el par motor es tanto menor cuanto mayor es este ángulo.

EJERCICIOS

1.º Hacer las comprobaciones experimentales contenidas en este capítulo, en un motor cualquiera, a ser posible de excitación shunt, montado con excitación separada.

2.º Alimentar un motor de excitación independiente con un generador de excitación serie (fig. 102). Se verá que

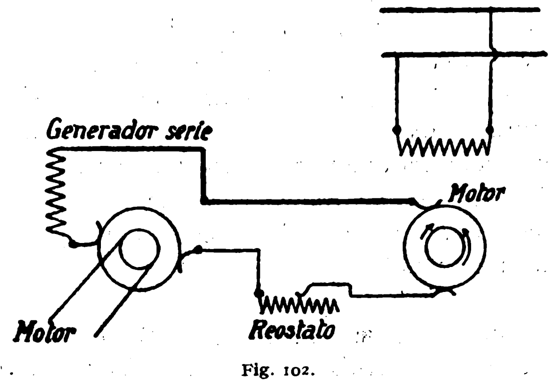


Fig. 102.

el motor toma un movimiento de rotación en dos sentidos alternativamente opuestos.

Explíquese este fenómeno.

CAPÍTULO VII

Propiedades de los motores

I. — Característica en vacío

Cualquiera que sea el motor de que se trate, siempre es conveniente trazar su característica en vacío, es decir, la curva del magnetismo de la máquina, que da a conocer el estado de su circuito magnético y la saturación de este circuito para las distintas condiciones de funcionamiento.

Esta curva es evidentemente la misma que si la máquina funciona como generador, y por tanto su trazado se hace de modo idéntico a como indicamos para este caso (pág. 45).

Sin embargo se puede trazar esta curva sin mover la máquina con un motor.

En efecto, supongamos que queremos trazar la característica en vacío para una velocidad dada N; se excita el motor independientemente y sobre el circuito inductor se colocan reostatos para hacer variar la excitación de un modo considerable (fig. 103). Entre las escobillas se aplica la tensión normal E_0 y se miden, para esta tensión y para diferentes valores de la corriente de excitación, las velocidades que toma el

motor en vacío. La corriente en el inducido es entonces muy pequeña y se puede despreciar la caída óhmica en el inducido, de modo que la fuerza contraelectromotriz desarrollada por el motor es casi igual a E_0. Sea i_0 la intensidad de la corriente de excitación a la cual

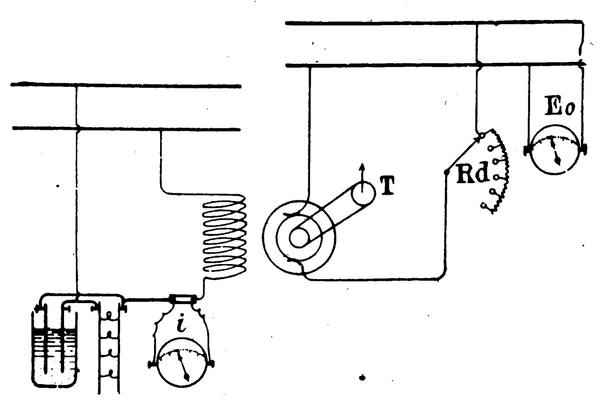


Fig. 103 (*Rd*, reostato de arranque).

corresponde la velocidad N: la fuerza contraelectromotriz a N vueltas para la excitación i_0 es E_0; para una excitación i_1, la tensión aplicada es también E_0, la velocidad es N_1; luego la fuerza contraelectromotriz desarrollada a la velocidad N_1 es E_0; a la velocidad N sería:

$$E_1 = E_0 \times \frac{N}{N_1}.$$

Por consiguiente, de este modo se pueden calcular las fuerzas contraelectromotrices para los diferentes valores de la corriente de excitación. Tomando como abscisas los valores de esta corriente y como ordenadas los valores de la fuerza contraelectromotriz correspondiente, se obtiene la curva de magnetismo de la máquina para la velocidad N.

Se puede construir fácilmente esta curva del modo

siguiente: se traza primero la curva AB de las velocidades, que tiene por abscisas las corrientes de excitación y por ordenadas las velocidades correspondientes (figura 104).

Tomemos, a escala conveniente: $OM = i_0$, que es la corriente de excitación a que corresponde la veloci-

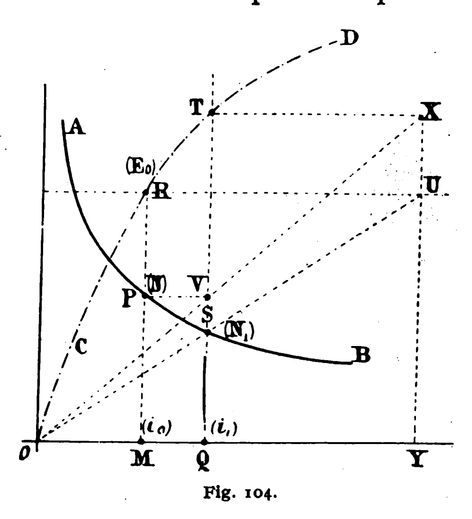


Fig. 104.

dad N y la tensión E_0 entre las escobillas; y la velocidad $N = MP$. Sobre MP se toma $MR = E_0$, siendo evidente que el punto R así obtenido es un punto de la curva. Sea N_1 la velocidad para una corriente de excitación i_1 ($OQ = i_1$, $QS = N_1$); se sabe que la fuerza contraelectromotriz, para esta excitación a la velocidad N, tiene por valor:

$$E_1 = E_0 \times \frac{N}{N_1}.$$

Por consiguiente, hay que hallar sobre la ordenada del punto Q un punto T tal que:

$$QT = E_0 \times \frac{N}{N_1}, \qquad \text{o sea que} \qquad QT = MR \times \frac{MP}{QS}.$$

Para conseguirlo, se traza por R una paralela al eje de las abscisas, que será cortada por la recta OS en un punto U; por P se traza otra paralela al eje de las abscisas, que cortará a QS en el punto V.

La recta OV corta a la ordenada del punto U en X, y la paralela al eje de las abscisas trazada por X corta a la recta QS en el punto buscado T. En efecto, se ve en esta figura que:

$$\frac{YX}{YU} = \frac{QV}{QS}, \qquad \text{o también} \qquad \frac{YX}{MR} = \frac{MP}{QS},$$

es decir, que:

$$\frac{YX}{E_0} = \frac{N}{N_1}, \qquad \text{de donde} \qquad YX = E_0 \frac{N}{N_1},$$

por consiguiente, se tiene:

$$QT = E_0 \times \frac{N}{N_1} = E_1.$$

El punto T es un punto de la característica en vacío, por lo cual, repitiendo la construcción para los distintos valores de la corriente de excitación, se tiene esta curva CD.

OBSERVACIÓN. — Este procedimiento da resultados menos precisos que los que se obtienen haciendo mover la máquina como generador, a causa de los errores que pueden cometerse en las lecturas del taxímetro.

II. — Motor shunt

Un motor shunt funciona generalmente con una diferencia de potencial constante. Su propiedad esencial es en estas condiciones la de tener una velocidad casi constante, cualquiera que sea la carga.

Comprobación: pequeñas variaciones de velocidad al variar el par resistente. — Se hace el montaje indi-

cado en la figura 105 (*Rd* es el reostato de arranque). Una vez puesto en marcha el motor, se pone la maneta

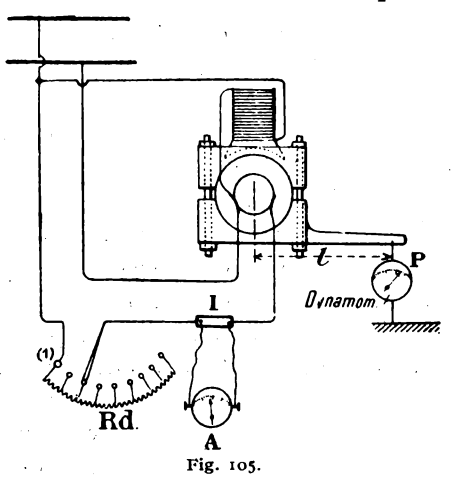


Fig. 105.

de este reostato sobre el tope 1 de cortocircuito; las zapatas del freno se aprietan de modo que el dinamómetro indique *P* kilogramos. En este momento se anota la velocidad del motor. Se vuelve a apretar el freno para obtener otra indicación del dinamómetro, y se lee la nueva velocidad. Esta operación se repite para varios valores de la fuerza aplicada en el extremo del freno, y se traza la curva cuyos puntos tienen por abscisas los valores del par

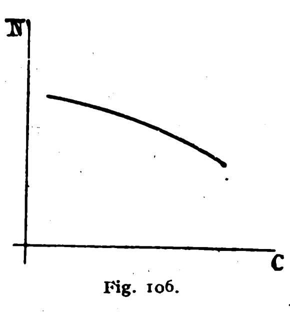


Fig. 106.

$$C = Pl \times 9{,}81 \text{ joules},$$

y por ordenadas las velocidades correspondientes *N* (figura 106).

La forma de esta curva indica que las variaciones

de la velocidad son pequeñas aun para grandes variaciones del par resistente.

Características electromecánicas. — Son las curvas que dan, en función de la potencia absorbida por el motor:

1.º La corriente en el motor; 2.º El par en la polea del motor; 3.º La velocidad; 4.º La potencia utilizable en la polea; y 5.º El rendimiento.

El trazado de estas cinco características se hace en una misma serie de operaciones. Sobre la polea se monta un freno; el motor se alimenta con un generador que pueda mantener una diferencia de potencial constante cualquiera que sea la corriente producida; con un reostato poco resistente se puede compensar la caída en la línea o las pequeñas variaciones de tensión que pueda sufrir este generador.

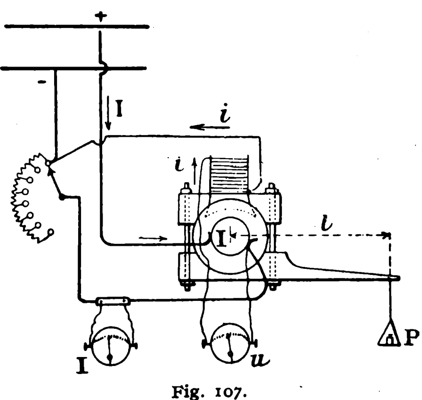


Fig. 107.

Mediante un voltímetro dispuesto en los bornes del motor, se puede comprobar la constancia de la tensión, y un amperímetro colocado en el circuito que alimenta el motor da la intensidad de la corriente (fig. 107).

En el platillo del freno hay un peso de P kilogramos, y aquél está convenientemente apretado para obtener el equilibrio. En cuanto se produce este equilibrio se leen: la intensidad de la corriente I y la velocidad N en vueltas por minuto, dadas por el taxímetro.

El par desarrollado en la polea del motor tiene por valor:

$$C = P \times l \text{ kilográmetros,}$$

siendo l, en metros, la longitud del brazo de palanca del freno. Expresando el par en joules, se tiene:

$$C = Pl \times 9{,}81 \text{ joules.}$$

La potencia recogida en la polea es (pág. 17):

$$W_u = 1{,}03\ PlN \text{ watts.}$$

Si la tensión se ha mantenido constantemente igual a U volts, la potencia comunicada al motor es:

$$W = UI \text{ watts,}$$

y el rendimiento en estas condiciones de funcionamiento es:

$$\rho = \frac{W_u}{W}.$$

Los resultados obtenidos se resumen en una tabla análoga a la siguiente:

Tensión normal: $U =$
Longitud del brazo de palanca del freno: $l =$

Tensión aplicada U	— Sensibilidad	Corriente en el motor: Lecturas	Shunts	Amperes I	Potencia comunicada $W = UI$ watts	Velocidad N vueltas por minuto	Peso en el platillo del freno P kilogramos	Par desarrollado sobre la polea $C = Pl \times 9{,}81$ joules	Potencia recogida en la polea $W_n = 1{,}03\ PlN$ watts	Rendimiento $\rho = \frac{W_u}{W}$	Pérdidas totales $W - W_u$

Tomando como abscisas los valores obtenidos para W y como ordenadas los valores correspondientes de I, N, C, W_u y ρ, se pueden construir las características electromecánicas del motor de que se trata. Las curvas resultantes tendrán las formas indicadas en la figura 108.

En la tabla anterior hay una columna para los valores de la tensión aplicada a los bornes del motor,

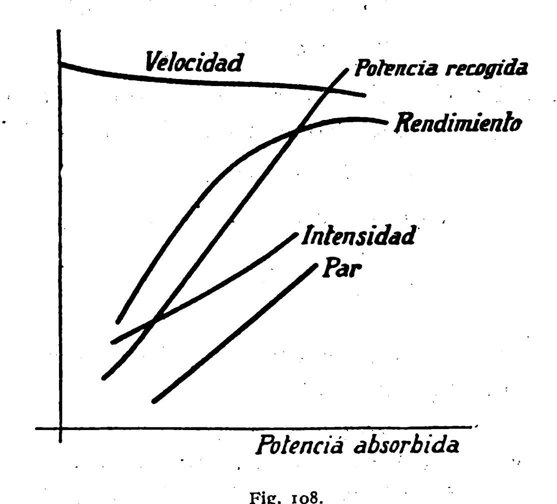


Fig. 108.

para el caso en que, a pesar de las precau iones tomadas, no sea posible obtener una tensión rigurosamente constante.

Observación I. — Es conveniente hacer estas pruebas después de estar funcionando el motor un cierto tiempo, para que adquiera su temperatura de régimen.

Observación II. — El freno debe apretarse con cuidado y sin sacudidas, para evitar que se atranque el motor, lo cual daría lugar inmediatamente a una intensidad excesiva; no se debe tampoco arrancar el motor

con el freno muy apretado, por lo cual conviene usar un freno elástico (pág. 18).

OBSERVACIÓN III. — Si el rendimiento hallado fuera defectuoso, es del mayor interés determinar las pérdidas en las distintas partes de la máquina, y para esto es muy útil colocar un amperímetro en el circuito inductor. Sea i la corriente de excitación; la pérdida por efecto Joule en el inductor es ri^2 watts, y la corriente en el inducido es:

$$I' = I - i.$$

La pérdida por efecto Joule en el inducido será, por lo tanto:

$R\,(I - i)^2$, siendo R la resistencia del inducido.

Como ya se conocen las pérdidas totales $W - W_u$, se deduce por diferencia la suma de las pérdidas por corrientes de Foucault y por histeresis, y las pérdidas mecánicas.

OBSERVACIÓN IV. — El trazado de la curva de los rendimientos en función de la potencia comunicada al motor constituye el tarado o contraste de la máquina, que permitirá determinar el rendimiento de una generatriz, como ya dijimos en la página 111.

Se ve fácilmente que del mismo modo, de la curva de los rendimientos de un generador se puede deducir el rendimiento de un motor.

Regulador de inducción o reostato de campo. — Acabamos de ver que la velocidad disminuye con la carga; puede darse el caso de quererla conservar constante, cualquiera que sea la variación de la carga, mediante un regulador de inducción. Para ello basta determinar el valor de la resistencia que hay que

poner en serie con el circuito inductor para mantener la velocidad de régimen con la carga máxima.

El motor está excitado independientemente y en el circuito inductor hay un reostato y un amperímetro; el freno se coloca sobre la polea y se aprieta poco a poco hasta que se obtenga la carga máxima con la tensión normal (fig. 109), y se hace variar la corriente

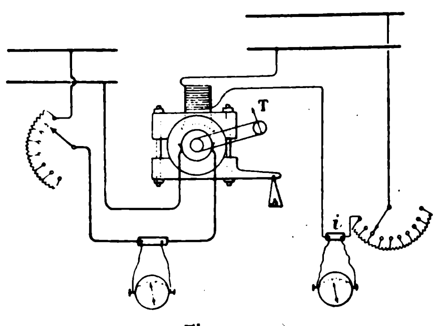


Fig. 109.

de excitación de modo que no varíe la velocidad de régimen, así como tampoco la carga máxima. Una vez cumplidas estas condiciones, se lee la corriente de excitación i; la resistencia máxima del reostato de campo es R, determinada por la siguiente relación:

$$i = \frac{U}{r + R},$$

donde U es la tensión normal a que está alimentado el motor, y r la resistencia de los inductores. Por consiguiente:

$$R = \frac{U - ri}{i}.$$

Observación. — Es mucho más cómodo, cuando sea posible obtener la carga, emplear un generador movido por el motor y cuya corriente pase por una resistencia conveniente.

EJEMPLO

Tarado, con el freno, de un motor shunt, y prueba de un generador movido por este motor

Basta mantener el motor a la velocidad de régimen del generador, 2 050 vueltas por minuto; los resultados obtenidos son los siguientes:

1.° Prueba del motor

Velocidad $N = 2050$

Longitud del brazo de palanca del freno: 1 metro

Diferencia de potencial en los bornes U	Corriente — Shunt: 30 Lecturas	Amperes I	Potencia comunicada $W = UI$ watts	Peso en el platillo del freno P Kg.	Potencia recogida en la polea $W_u = 1{,}03\ PlN$ watts	Pérdidas totales $W - W_u$	Rendimientos $\frac{W_u}{W}$
127	17	5,1	647	0,100	211	436	0,32
126	23	6,9	869	0,200	422	447	0,48
125	29	8,7	1 087	0,300	633	454	0,58
125	35	10,5	1 312	0,400	844	468	0,64
124	41	12,3	1 525	0,500	1 055	470	0,69
123	48	14,4	1 771	0,600	1 266	505	0,71
123	52	15,6	1 918	0,650	1 372	546	0,71
122	55	16,5	2013	0,700	1 477	536	0,73

Las curvas de la figura 110, cuyas abscisas son los valores de la potencia comunicada, representan gráficamente estos resultados.

2.° Prueba del generador

El generador es movido por el motor que acabamos de estudiar.

Se lee la tensión U en sus bornes y la corriente I que produce, así como la tensión U' aplicada en los bornes del motor y la corriente I' absorbida. El producto $W = U' I'$ es el valor de la potencia tomada por

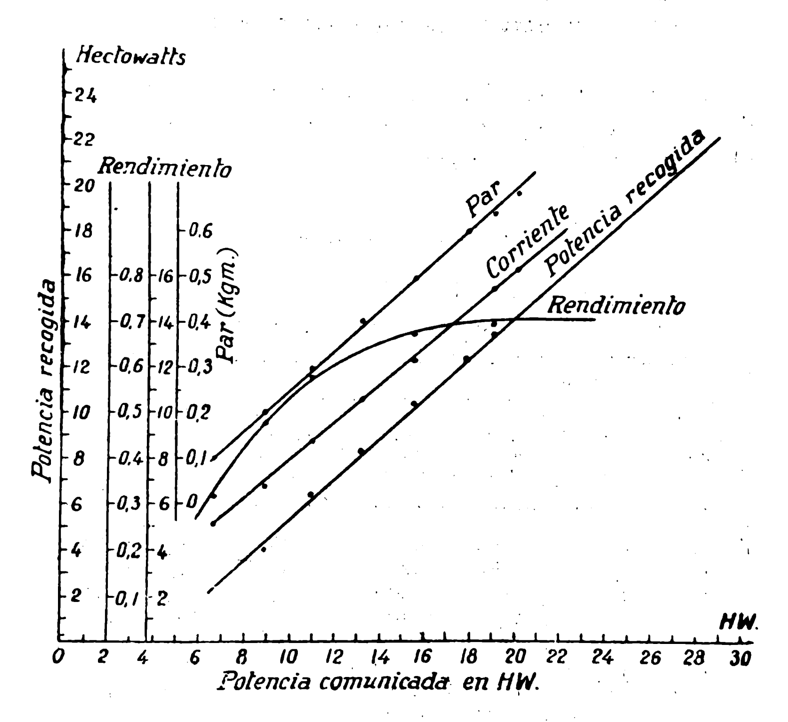


Fig. 110.

el motor; este valor se toma como abscisa (fig. 110) y la curva de las potencias recogidas da el valor de la potencia en la polea del generador. El producto $W'_u = U I$ mide la potencia en los bornes del generador, y el rendimiento es $\frac{W_u}{W}$. Los resultados obtenidos están consignados en los cuadros siguientes:

Motor tarado o contrastado

Diferencia de potencial en los bornes U'	Corriente shunt 30 amperes		Potencia absorbida por el motor $W' = U' I'$	Potencia sobre la polea deducida de la curva de tara W
	lecturas	amperes I'		
125	33,5	10,05	1 256	791
128	35	10,8	1 382	879
127	39	11,7	1 486	984
126	55	16,5	2 079	1 477
124	69,5	20,85	2 585	1 950
123	85	25,5	3 136	2 410

Generador

Diferencia de potencial en los bornes U	Corriente shunt 10 amperes		Potencia recogida $W_u = UI$	Pérdidas totales $W - W_u$	Rendimiento $\frac{W_u}{W}$
	lecturas	amperes I			
178	0	0	0	791	0
175,4	7,2	0,72	126	753	0,144
173,4	14,4	1,44	250	733	0,257
169	45,5	4,55	769	708	0,52
165	73,3	7,33	1 209	741	0,61
161	90	9,8	1 577	833	0,654

Las curvas de la figura 111 expresan gráficamente estos resultados, siendo las abscisas los valores de la potencia recogida en los bornes del generador [1].

[1] Es conveniente trazar en papel milimétrico los curvas obtenidas por resultados experimentales, comprobando les resultados obtenidos que hay en esta tabla.

III. — Motor serie

Un motor serie alimentado a tensión constante está caracterizado: 1.º por un par considerable al arrancar;

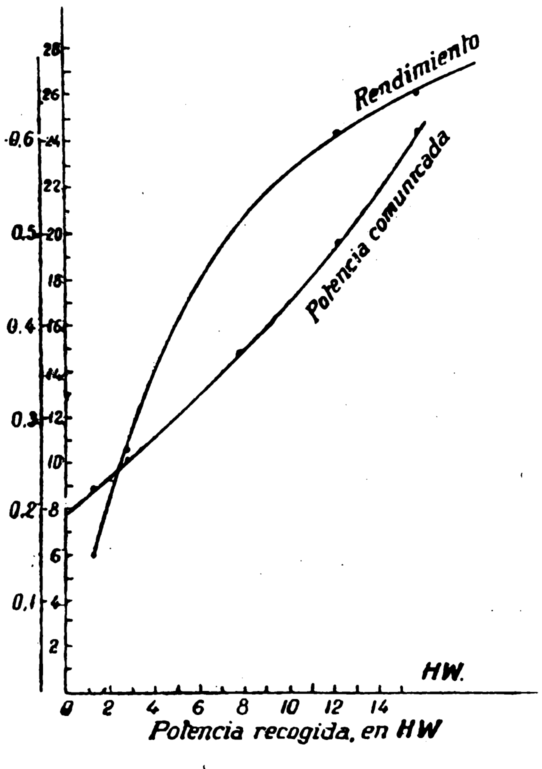


Fig. 111.

2.º por una velocidad que disminuye con mucha rapidez cuando el par resistente aumenta.

Estas propiedades son fáciles de comprobar, del modo indicado para el motor shunt.

EJEMPLO

Pruebas de arranque y de variaciones de velocidad, hechas con un motor serie Gramme a 250 volts y 8 amperes

1.° *Arranque*. — Longitud del brazo de palanca del freno, $l = 0,375$ m.

Intensidad de arranque Shunt : 10 amperes		Peso en el platillo del freno P Kg.	Par Pl Kgm.
lecturas	amperes I		
30	3	1	0,375
33	3,3	1,200	0,450
40	4	1,500	0,562
49	4,9	2,000	0,750
56	5,6	2,400	0,900
61,8	6,18	2,600	0,975
69,5	6,95	3,000	1,130
78	7,8	3,500	1,300
87	8,9	4,000	1,500
96	9,6	4,500	1,690

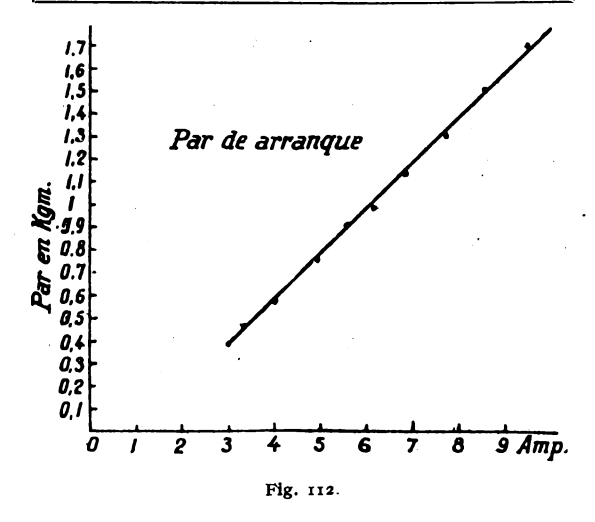


Fig. 112.

La curva de la figura 112, cuyas abscisas son los diferentes valores de I, y cuyas ordenadas son los corres-

pondientes valores del par de arranque, expresa gráficamente estos resultados y pone de manifiesto el aumento brusco del par de arranque al aumentar la corriente.

2.º *Velocidad.* — Longitud del brazo de palanca del freno, $l = 1$ metro.

Peso en el platillo del freno	Par	Velocidad en vueltas por minuto
0,100	0,1	1 320
0,200	0,2	1 140
0,300	0,3	1 020
0,500	0,5	840
0,600	0,6	780
0,800	0,8	640
1,000	1,0	580
1,200	1,2	500
1,300	1,3	460
1,400	1,4	420
1,500	1,5	360

En la curva de la figura 113, que representa estos resultados, se ve que la velocidad disminuye rápidamente cuando el par resistente aumenta.

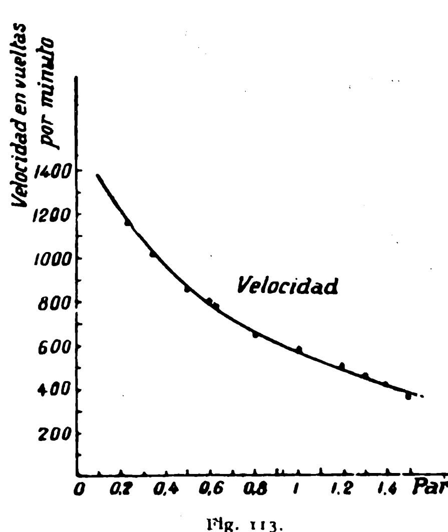


Fig. 113.

Características. — Todos los constructores han reconocido el gran interés que presentan las curvas siguientes:

1.ª *Características electro-*

mecánicas. — Estas curvas tienen por abscisas los valores de la corriente en el motor y por ordenadas los valores correspondientes de la potencia comunicada, de la potencia recogida, de la velocidad, del par motor y del rendimiento.

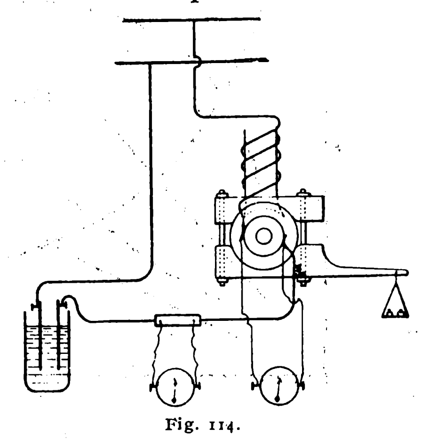


Fig. 114.

2.º *Características mecánicas.* — Estas curvas tienen por abscisas los valores de la velocidad y por ordenadas los valores correspondientes de las cantidades que hemos indicado para las curvas precedentes.

Para trazar estas curvas se empieza por hacer el montaje que indica la figura 114, procediéndose del mismo modo que se dijo para un motor shunt, y reuniendo los resultados en una tabla como la siguiente:

Longitud del brazo de palanca del freno: $l =$ metros

Tensión aplicada — Sensibilidad		Corriente			Potencia comunicada $W = UI$	Peso en el platillo del freno P kilogramos	Par $C = Pl$ kilográmetros	Velocidad N vueltas por minuto	Potencia recogida $W_u = 1{,}03\ CN$	Rendimiento $\frac{W_u}{W}$	Pérdidas $W - W_u$
Lecturas	Volts U	Lecturas	Shunts	Amperes I							

Las curvas de que hemos hablado en la página ante-

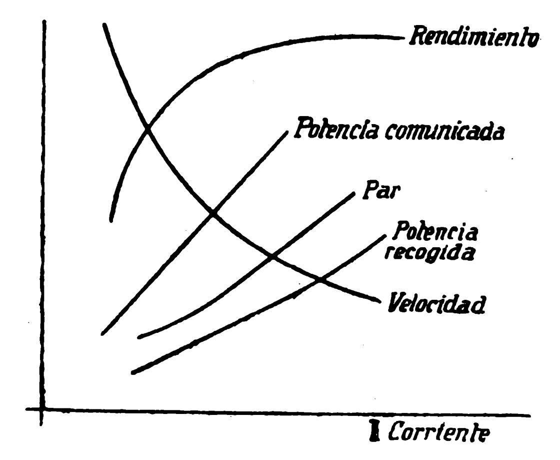


Fig. 115.

rior, y que representan gráficamente estos resultados, tienen las formas que se ven en las figuras 115 y 116.

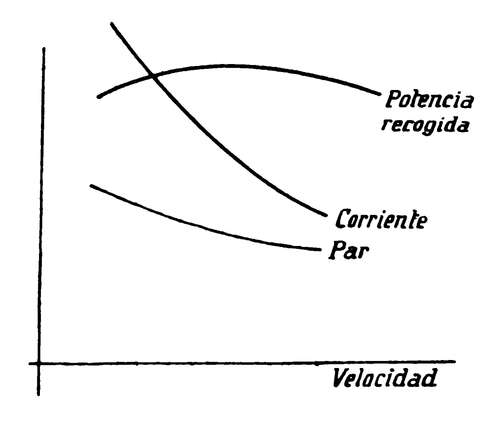


Fig. 116.

EJEMPLO. — **Prueba de un motor serie**

Tensión $u = 105$ volts

Longitud del brazo de palanca del freno: $l = 1$ metro

Intensidad Shunt: 50 amperes — lecturas	Intensidad Shunt: 50 amperes — amperes I	Potencia comunicada $W = UI$ watts	Peso P Kg.	Par $C = Pl$ Kgm.	Velocidad N vueltas por minuto	Potencia recogida $W_u = 1{,}03\ CN$ watts	Rendimiento $\rho = \frac{W_u}{W}$
82	41	4305	3	3	1 160	3584	0,83
72	36	3780	2,5	2,5	1 240	3066	0,82
62	31	3255	2	2	1 320	2719	0,83
51	25,5	2677	1,5	1,5	1 440	2217	0,82
40	20	2 100	1	1	1 640	1 689	0,80
36	18	1 890	0,75	0,75	1 700	1 370	0,72
28	14	1 470	0,50	0,50	1 980	1 009	0,68

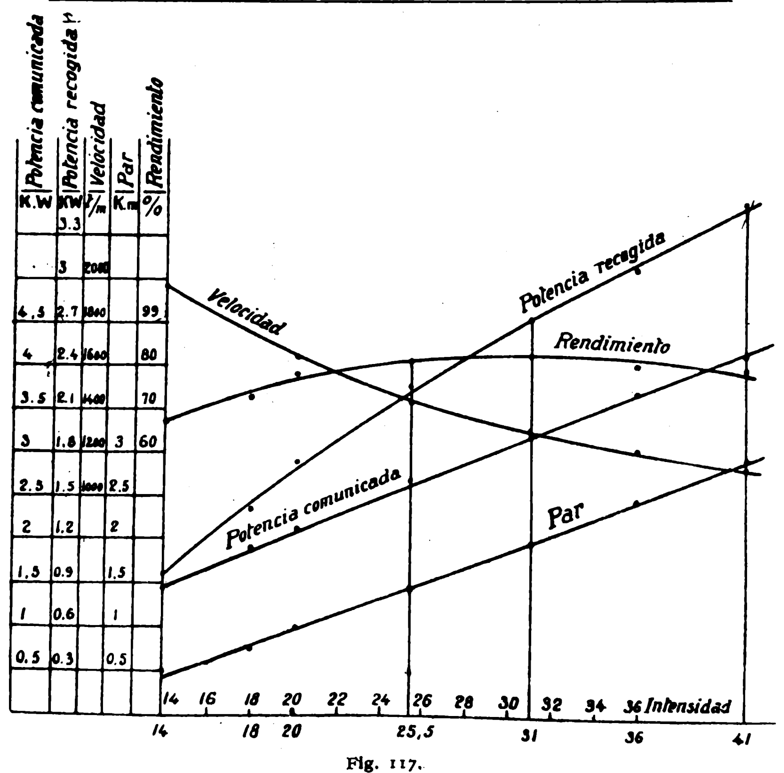


Fig. 117.

Las curvas correspondientes al referido ensayo son las indicadas por las figuras 117 y 118.

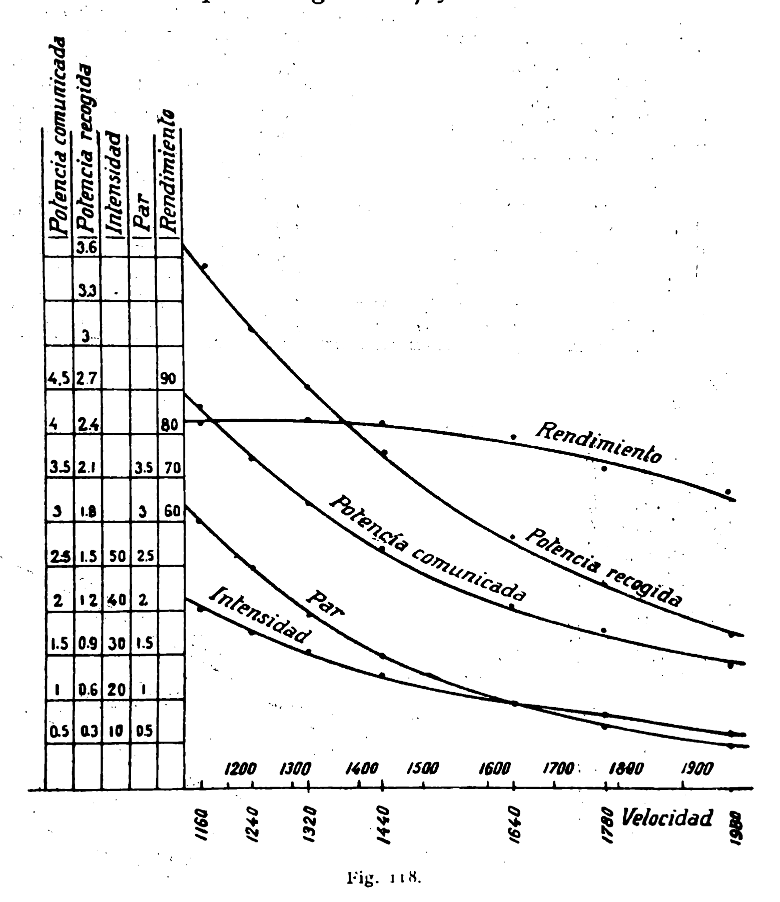


Fig. 118.

IV. — Excitación compound

Las conexiones pueden hacerse de modo que los flujos producidos por los devanados inductores serie y shunt tengan el mismo sentido, y por lo tanto, se

sumen, o bien de modo que estos flujos sean de sentido contrario, y por consiguiente se resten.

Se puede ver cómo están hechas estas conexiones, de la manera siguiente.

Estando alimentado el motor por un generador, se le hace girar, en vacío o en carga, moviendo una dinamo por ejemplo, y se mide su velocidad; después, mientras está girando, se pone el devanado serie en cortocircuito, con lo cual queda suprimido el flujo que producía este devanado (figura 119). Si se ve que aumenta la velocidad, significa que el flujo total en el inducido ha disminuído, y por lo tanto, que los dos flujos se suman; al contrario, si disminuye la velocidad, quiere decir que el flujo total habrá aumentado, y por lo tanto, que los dos flujos son de sentido inverso, es decir, flujos opuestos.

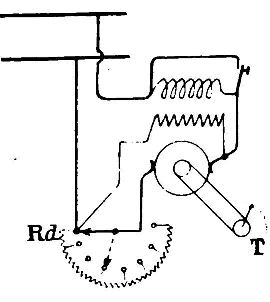


Fig. 119.

Motor con flujos de igual sentido. — En este caso se sabe que el motor está caracterizado por las siguientes propiedades:

1.ª El par de arranque crece con mucha rapidez al aumentar la corriente.

2.ª La velocidad decrece rápidamente cuando el par resistente aumenta.

Se comprueban estas dos propiedades trazando, como hemos dicho anteriormente, dos curvas, una que tenga por abscisas los valores de la corriente I en el motor y por ordenadas los valores correspondientes del par de arranque, y otra cuyas abscisas sean los valores del par resistente, y cuyas ordenadas sean

los correspondientes valores de la velocidad. Estas curvas tienen las formas representadas en las figuras 120 y 121.

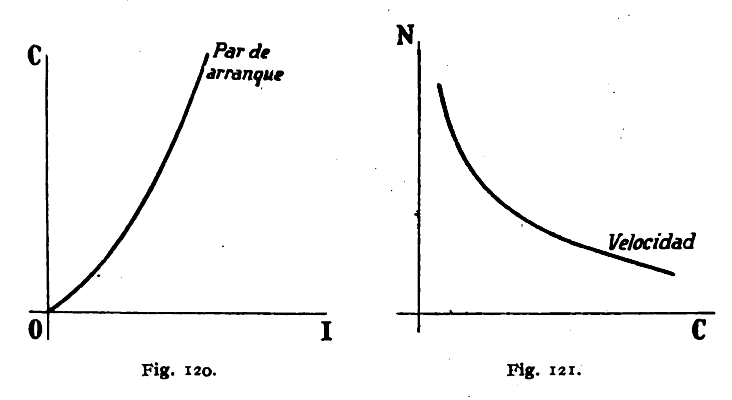


Fig. 120. Fig. 121.

Motor con flujos de sentidos opuestos. — Esta clase de motores está caracterizada: 1.° por un par de arranque que al principio crece al aumentar la corriente, para corrientes poco intensas, y que después decrece, es decir, que el par pasa por un máximo; 2.° por una

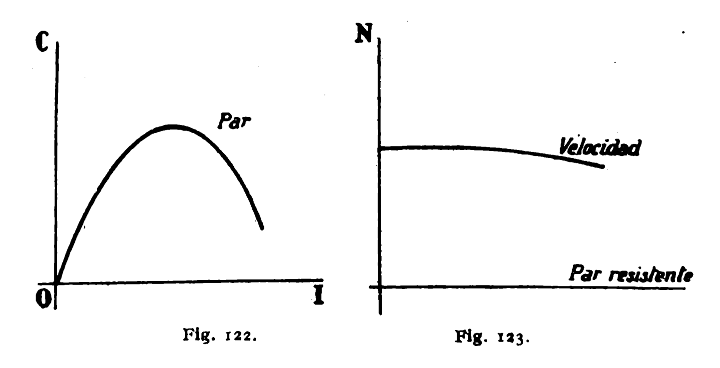


Fig. 122. Fig. 123.

velocidad que varía muy poco con la corriente. En las figuras 122 y 123 se ven las curvas que representan estas variaciones, trazadas del modo ya indicado.

Características. — Las características electromecánicas y mecánicas se trazan del modo que ya dijimos para un motor shunt o para un motor serie.

EJERCICIOS

1.º Estudio de un motor shunt alimentado a tensión constante.

Característica en vacío. — Características electromecánicas. — Rendimientos con distintas cargas, y curva de los rendimientos.

2.º Estudio de un motor serie alimentado a tensión constante.

Característica en vacío. — Curva de las variaciones del par de arranque en función de la corriente. — Curva de las velocidades en función de los pares resistentes.—Características mecánicas y electromecánicas. — Rendimiento.

3.º Estudio de un motor compound.

a) Hacer las conexiones de modo que los flujos de los dos devanados, shunt y serie, se sumen. — Comprobación.

Curva de los pares de arranque en función del par resistente.

Características electromecánicas. — Rendimiento.

b) Hacer las conexiones de manera que los flujos de los dos devanados se resten, trazando las mismas curvas que en el caso precedente.

4.º Alimentar los motores con una corriente constante, y trazar las curvas de la velocidad y del par motor en función de la tensión aplicada.

5.º Hacer girar los motores a velocidad constante, y trazar las curvas de la tensión aplicada y del par motor desarrollado, en función de la corriente.

CAPÍTULO VIII

Determinación del rendimiento de un motor

I. — Método de las pérdidas separadas

Ya anteriormente hemos expuesto un método para determinar el rendimiento de un motor, midiendo la potencia $W = UI$ watts comunicada a la máquina y la potencia $W_u = 1{,}03\ CN$ recogida en la polea y dividiendo una por otra, es decir:

$$\rho = \frac{W_u}{W}.$$

También puede determinarse el rendimiento por el método de las pérdidas separadas, como para un generador. No repetiremos la teoría de este método (véase página 114), limitándonos únicamente a dar un ejemplo.

Supongamos que se trate de determinar el rendimiento de un motor que funciona en las siguientes condiciones:

Diferencia de potencial aplicada en los bornes	$U =$	110 volts
Corriente total en el motor	$I =$	30 amperes
Velocidad en vueltas por minuto.	$N =$	1200

La potencia comunicada al motor es:

$$UI = 110 \times 30 = 3300 \text{ watts};$$

sea W_p la potencia perdida: la potencia recogida en la polea es $UI - W_p$, y el rendimiento:

$$\rho = \frac{UI - W_p}{UI}.$$

Evaluación de las pérdidas W_p. — Se determina experimentalmente la corriente i en el inductor para las condiciones dadas de funcionamiento, y la resistencia R del inducido; y supongamos que tengan respectivamente por valor $i = 1{,}5$ amperes y $R = 0{,}2$ ohms.

1.° *Pérdidas por efecto Joule en el inducido* RI'^2. — La corriente en el inducido es I':

$$I' = I - i = 30 - 1{,}5 = 28{,}5 \text{ amperes,}$$
$$RI'^2 = 0{,}2 \times 28{,}5^2 = 162 \text{ watts.}$$

2.° *Pérdidas por efecto Joule en el inductor:*

$$Ui = 110 \times 1{,}5 = 165 \text{ watts.}$$

3.° *Pérdidas mecánicas y electromagnéticas.* — Para evaluar estas pérdidas se excita el motor independientemente; se aplica en los bornes del inducido, por las razones expuestas al tratar de los generadores (página 116), una tensión U' tal, que:

$$U' = U - RI' = 110 - 0{,}2 \times 28{,}5 = 104 \text{ volts;}$$

se regula la intensidad de la corriente de excitación de modo que se obtenga en vacío una velocidad de 1 200 vueltas por minuto, y se mide la corriente tomada por el motor y por consiguiente en el inducido; sea $I_0 = 2{,}5$ amperes esta corriente. Según estos valores, la potencia tomada por el motor en vacío a 1 200 vueltas es:

$$U'I_0 = 104 \times 2{,}5 = 260 \text{ watts.}$$

Toda esta potencia es igual a las pérdidas, porque

el motor gira de vacío; estas pérdidas son: las pérdidas mecánicas y electromagnéticas, que son las mismas que en carga en las condiciones dadas, y las pérdidas por efecto Joule en el inducido. Estas últimas pérdidas tienen por valor:

$$RI_0^2 = 0{,}2 \times 2{,}5^2 = 1{,}25 \text{ watts};$$

luego las pérdidas mecánicas y electromagnéticas valen:

$$260 - 1{,}25 = 258{,}75$$

es decir, 259 watts aproximadamente. Por lo tanto, la suma de las pérdidas es:

$$162 + 165 + 259 = 586 \text{ watts.}$$

Y el rendimiento será:

$$\frac{3\,300 - 586}{3\,300} = 0{,}82 = 82\ \%.$$

OBSERVACIÓN I. — Si no sólo se quiere determinar el rendimiento del motor en condiciones de funcionamiendo dadas, sino trazar una curva de tara que dé este rendimiento para todas las cargas, es más cómodo proceder del modo siguiente.

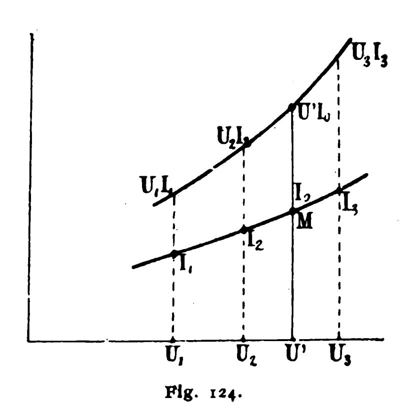


Fig. 124.

Se miden las corrientes I_1, I_2, I_3... tomadas en vacío a la velocidad de régimen, para tensiones aplicadas en los bornes U_1, U_2, U_3... próximas a la tensión normal U (en el caso que acabamos de estudiar se habrían tomado, por

ejemplo, las tensiones: 114, 112, 110, 108, 106... volts). Se construyen dos curvas que tengan por abscisas diferentes valores de la tensión aplicada U_1, U_2, U_3... y por ordenadas los valores correspondientes de la corriente: I_1, I_2, I_3... la primera, y la otra los valores de la potencia en vacío $U_1 I_1$, $U_2 I_2$ (fig. 124).

Si se quiere el rendimiento para una carga dada del motor (tensión U, corriente I, corriente de excitación medida i), se toma sobre cada una de estas curvas el punto de abscisa $U' = U - R\,(I - i)$; uno de ellos, M, da la corriente en vacío I_0, y el otro la potencia absorbida en vacío $U'\,I_0$. Las pérdidas mecánicas son, según lo dicho, $UI_0 - RI_0^2$ y el rendimiento tendrá el siguiente valor:

$$\frac{UI - [R(I - i)^2 + UI + UI_0 - RI_0^2]}{UI}.$$

Repitiendo las mismas construcciones y cálculos para diferentes cargas, se puede trazar la curva de tara del motor.

OBSERVACIÓN II. — Si se quieren separar las pérdidas mecánicas de las electromagnéticas, se procede del mismo modo que se hizo en el caso de un generador (fig. 120).

II. — Método de oposición

1.° **Método de Hopkinson.** — Este método se aplica cuando se dispone de dos máquinas idénticas, lo cual es muy corriente en cualquier taller de construcción.

Fundamento del método. — Las dos máquinas M_1 y M_2 están acopladas mecánicamente y de un modo directo y movidas por un motor tarado m, de poca potencia respecto a la de las máquinas consideradas

(figura 125). Las dos máquinas se excitan independientemente, y las corrientes de excitación son tales que una de las máquinas, M_2 por ejemplo, tiene una fuerza electromotriz mayor que la otra M_1. Estas máquinas están montadas en oposición, de manera que la máquina M_2 envía la corriente que produce a la M_1, es decir, que la primera obra como generador y la segunda como motor. Se comprende que si no hubiera ninguna pérdida de energía, la potencia gastada por el motor auxiliar *m* sería nula, pero como hay pérdidas, el motor *m* debe proporcionar una potencia que mide evidentemente el valor de la potencia perdida en las dos máquinas. Por estar tarado el motor *m* se conoce su rendimiento para todas las cargas, y por consiguiente la potencia comunicada W_p a las dos máquinas. Como dichas máquinas están excitadas independientemente, estas pérdidas son: 1.º, las pérdidas por efecto Joule en los inducidos (se toman cables de unión de resistencia despreciable); 2.º, las pérdidas mecánicas y electromagnéticas W_m. Por consiguiente, se tiene:

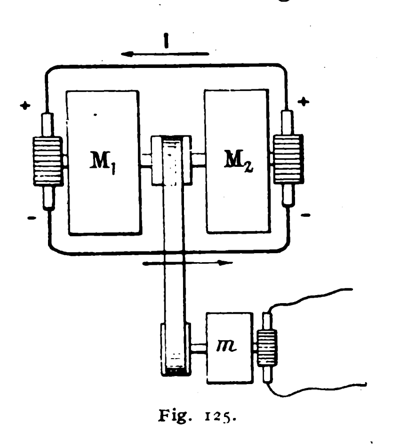


Fig. 125.

$$W_p = 2\,RI^2 + 2\,W_m; \quad (1)$$

donde R es la resistencia de cada inducido, I la corriente en los dos inducidos, y W_m las pérdidas mecánicas y electromagnéticas en cada máquina. Será preciso, por lo tanto, regular de modo que estas pérdidas sean las mismas que cuando las máquinas fun-

cionan en las condiciones en que se quiere medir el rendimiento.

Supongamos, por ejemplo, que se quiera medir el rendimiento de estas máquinas funcionando en las siguientes condiciones: tensión entre las escobillas, U volts; corriente en el inducido, I amperes; velocidad, N vueltas por minuto (en estas condiciones la fuerza electromotriz desarrollada es $U + RI$, siendo R la resistencia del inducido).

Para que las pérdidas por efecto Joule y las pérdidas mecánicas y electromagnéticas sean las mismas en la prueba que en las condiciones dadas de funcionamiento, es preciso que la corriente en los inducidos sea la misma I, que la velocidad N sea la misma y que los flujos en los inducidos sean los mismos, es decir, que las fuerzas electromotrices tengan por valor $U + RI$. Pero esta última condición no puede realizarse, porque estando las dos máquinas montadas en oposición y teniendo igual fuerza electromotriz, no circulará corriente alguna por los inducidos.

Sin embargo, como las resistencias de los inducidos son pequeñas, basta muy poca diferencia de fuerza electromotriz en las dos máquinas para producir la corriente I, y por consiguiente sólo es preciso que haya muy poca variación entre las fuerzas electromagnéticas desarrolladas en la prueba y la fuerza electromotriz que tendría cada máquina en las condiciones dadas de funcionamiento.

Se regulan las condiciones de excitación i_1 e i_2 de las dos máquinas de modo que queden satisfechas las condiciones siguientes:

1.º Corriente en los inducidos, I.

2.º Diferencia de potencial común entre las escobillas de las dos máquinas, $U + RI$; en estas condiciones, la fuerza electromotriz desarrollada por la máquina que

funciona como generador es $(U + RI) + RI$, o sea $U + 2\,RI$, y la fuerzas electromotriz desarrollada por la que òbra como motor es $(U + RI) - RI = U$.

Ahora bien, estas fuerza electromotrices $U + 2\,RI$ y U se diferencian muy poco de la fuerza electromotriz $U + RI$ desarrollada en las condiciones dadas de funcionamiento, y por consiguiente, los flujos en el inducido en estos dos casos son aproximadamente los mismos.

Por lo tanto, siendo N la velocidad, las pérdidas mecánicas y electromagnéticas en la prueba son muy aproximadamente iguales a estas mismas pérdidas en las condiciones de funcionamiento en que se quiere determinar el rendimiento.

Sabemos que si la máquina funciona como generador y si la corriente de excitación es i, el rendimiento es:

$$\rho = \frac{U\,(I - i)}{U\,(I - i) + Ui + RI^2 + W_m}$$

y según la igualdad (1), se tiene:

$$RI^2 + W_m = \frac{W_p}{2};$$

luego:

$$\rho = \frac{U\,(I - i)}{U\,(I - i) + Ui + \frac{W_p}{2}} = \frac{U\,(I - i)}{UI + \frac{W_p}{2}}.$$

En estas fórmulas, $I - i$ es la corriente en el circuito exterior (fig. 126).

La figura 127 representa el montaje que hay que hacer. Estando abierto el interruptor K, se hace que el motor m mueva a las dos máquinas y se regulan las excitaciones de M_1 y M_2, de modo que se tengan las mismas fuerzas electromotrices, dadas por los voltí-

metros V_1 y V_2 o por un solo voltímetro y un conmutador. Se cierra entonces K, con lo cual no pasa ninguna corriente por los inducidos, como indica el amperímetro A; después se regulan con los reostatos R_1 R'_1 y R_2 R'_2 las corrientes de excitación de manera que A marque I amperes y los voltímetros V_1 y V_2 el voltaje $U + RI$, siendo la velocidad igual a N. Una vez realizadas estas condiciones, se anota la tensión U' en los bornes del motor m, y la corriente I' en este motor; se busca, sobre la curva de tara, el rendimiento r correspondiente a la potencia comunicada $U' I'$; la

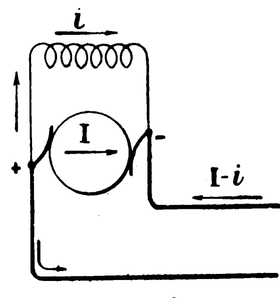


Fig. 126.

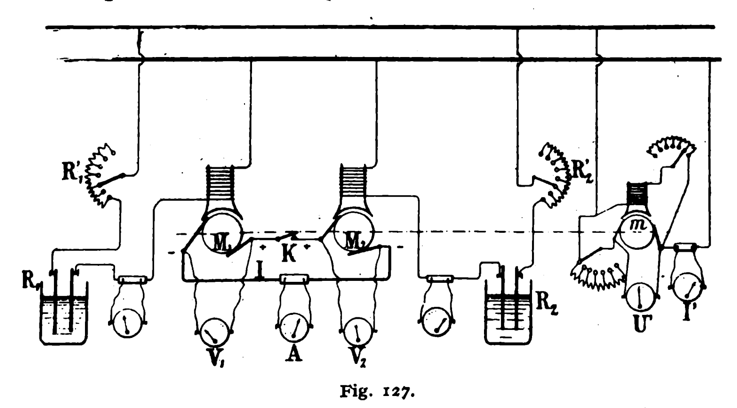


Fig. 127.

potencia desarrollada en su polea es $U' I' \times r$, y por consiguiente:

$$W_p = U'I' \times r.$$

Si la trasmisión del movimiento del motor m a las máquinas M_1 y M_2 se hace por correa, hay que tener en cuenta la correspondiente pérdida de potencia.

EJEMPLO. — Supongamos que se trata de medir el rendimiento de dos máquinas idénticas de resistencia interior de 0,24 ohms en las siguientes condiciones de funcionamiento: tensión entre las escobillas, 115 volts; corriente en el inducido, 25 amperes; velocidad, 1 500 vueltas por minuto. En estas condiciones, sabemos que la corriente de excitación es de 0,85 amperes.

Hecho el montaje como ya se ha indicado, se regulan las excitaciones de modo que a la velocidad de 1 500 vueltas la corriente en los inducidos sea de 25 amperes, y la diferencia de potencial en los bornes de las máquinas sea de:

$$115 + 0,24 \times 25 = 121 \text{ volts.}$$

En estas condiciones, la tensión medida en los bornes del motor auxiliar es de 132 volts, y la corriente en el motor es de 9,8 amperes.

Por consiguiente, la potencia absorbida es:

$$132 \times 9,8 = 1293,6.$$

La curva de tara de este motor da para esta carga un rendimiento del 78 %, luego la potencia en la polea común a las dos máquinas es:

$$1\,293,6 \times 0,78 = 1011 \text{ watts.}$$

Esta potencia mide la suma de las pérdidas por efecto Joule en el inducido y de las pérdidas mecánicas y electromagnéticas de las dos máquinas; por lo tanto, en cada máquina la pérdida será de:

$$\frac{1011}{2} = 505,5.$$

Las pérdidas por efecto Joule en cada máquina son:

$$0,24 \times 25^2 = 150 \text{ watts.}$$

Las pérdidas mecánicas y electromagnéticas tienen, por consiguiente, un valor igual a:

$$505,5 - 150 = 355,5.$$

Se sabe que la corriente inductora es de 0,85 amperes, luego las pérdidas por efecto Joule en el circuito inductor valen:

$$115 \times 0,85 = 97,75.$$

Por lo tanto, en estas condiciones, el rendimiento es:

$$\frac{115\,(25 - 0,85)}{115\,(25 - 0,85) + 505 + 115 \times 0,85} = \frac{115\,(25 - 0,85)}{115 \times 25 + 505} = 0,82,$$

es decir, el 82 %.

OBSERVACIÓN. — Si se hubiera querido estudiar el rendimiento de las dinamos funcionando como motores, se tendría que haber fijado el valor común del voltaje entre las escobillas durante la prueba en $U - RI$, en vez de $U + RI$.

2.° **Método de Blondel.** — En el método anterior, los flujos en los inducidos de las dos máquinas difieren un poco durante la prueba, y en las condiciones de funcionamiento en que se estudian las máquinas. Para que estos flujos fueran los mismos sería preciso que las fuerzas electromotrices de las dos máquinas fueran iguales a $U + RI$, siendo U la tensión entre las escobillas, I la corriente en el inducido y R la resistencia del inducido; pero entonces, estando las dos máquinas en oposición y con igual fuerza electromotriz, no circularía corriente alguna por el circuito de los inducidos. Blondel obtiene la corriente I introduciendo en este circuito unos cuantos acumuladores o un elevador de tensión. El montaje para esta prueba es el indicado en

la figura 128; M_1 y M_2 son las dos máquinas acopladas, excitadas por un generador de corriente, por ejemplo, por una batería de acumuladores o movidas por un motor *m*. Se regula la corriente de excitación de las dos máquinas de modo que estando abiertos los inte-

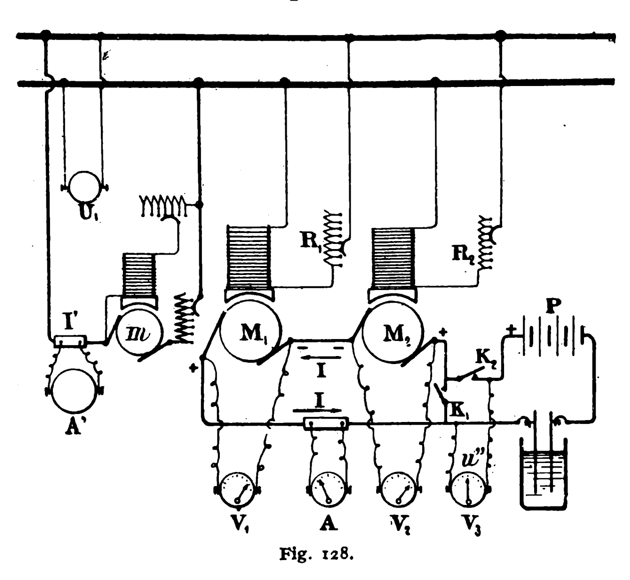


Fig. 128.

rruptores K_1 y K_2 y siendo la velocidad la de régimen N, los voltímetros V_1 y V_2 indiquen dos fuerzas electromotrices iguales a $U + RI$; si se cierra K_1 se ve que no circula corriente alguna por el circuito de los inducidos. Entonces se abre K_1 y se cierra K_2, y se regula el reostato líquido de modo que se tenga en los inducidos la corriente I dada por el amperímetro A. Conseguido esto, se anota la tensión U' en los bornes del motor *m*, la corriente I en este motor y la tensión U'' en los bornes de la batería, dada por el voltímetro V_3. En este momento las dos máquinas tienen todavía la misma fuerza electromotriz E, y la tensión

entre las escobillas de M_2 es $U_2 = E - RI$, mientras que entre las escobillas de M_1 es $U_1 = E + RI$. La potencia dada por los acumuladores P al circuito de los inducidos es $U'' I$ igual a la suma de las pérdidas por efecto Joule en los inducidos, pues según las leyes de Kirchhoff se tiene:

$$U'' + E - E = 2\,RI,$$

o sea:

$$U'' = 2\,RI, \qquad \text{de donde} \qquad U''I = 2\,RI^2.$$

Por lo tanto, las pérdidas por efecto Joule en cada máquina, son $\dfrac{U''I}{2}$.

La potencia comunicada por el motor auxiliar m se emplea en compensar las pérdidas mecánicas y electromagnéticas de las dos máquinas. La potencia absorbida por el motor es $U' I'$, y si ρ es su rendimiento para esta carga, la potencia trasmitida a la máquina es:

$$W_m = U'I'\rho,$$

y las pérdidas mecánicas y electromagnéticas en cada máquina tienen por valor:

$$\frac{U'I'\rho}{2}.$$

Por consiguiente, si se quiere utilizar una de las máquinas como motor de modo que la corriente en el inducido sea I y la tensión aplicada U, siendo la corriente de excitación i para su velocidad N (velocidad a que se mueven las máquinas durante la prueba), su rendimiento será:

$$\frac{U\,(I+i) - \dfrac{U''I}{2} - \dfrac{U'I'\rho}{2}\,Ui}{U\,(I+i)} = \frac{UI - \dfrac{U''I + U'I'\rho}{2}}{U\,(I+i)}$$

Si en las mismas condiciones se utiliza la máquina

que antes hacía de motor como generador, su rendimiento es:

$$\frac{U(I-i)}{U(I-i)+\frac{U''I}{2}+\frac{U'I'\rho}{2}+Ui}=\frac{U(I-i)}{UI+\frac{U''I+U'I'\rho}{2}}.$$

EJEMPLO. — La resistencia del inducido de cada máquina es de 0,3 ohms. Se quiere determinar el rendimiento en las siguientes condiciones: tensión entre las escobillas, 110 volts; corriente en el inducido, 35 amperes; velocidad, 1 400 vueltas. En estas condiciones la corriente de excitación es de 0,93 amperes.

Estando abiertos los interruptores K_1 y K_2 se regulan las excitaciones de las dos máquinas de manera que se obtengan fuerzas electromotrices iguales a:

$$110 + (0,3 \times 35) = 120,5 \text{ volts.}$$

Se comprueba que estando cerrado el interruptor K_1, el amperímetro A no indica corriente alguna. Se abre K_1 y se cierra K_2, y se regula el reostato líquido para que A indique 35 amperes; el motor m se alimenta de modo que mueva las máquinas a la velocidad de 1 400 vueltas por minuto.

En este momento el voltímetro V_3 indica 19 volts; la tensión en los bornes del motor m es 107 volts y la corriente en el motor 6,3 amperes.

Por lo tanto, las pérdidas por efecto Joule en ambas máquinas son:

$$19 \times 35 = 665 \text{ watts,}$$

es decir, en cada una de ellas:

$$\frac{665}{2} = 332,5 \text{ watts.}$$

La potencia absorbida por el motor m es:

$$107 \times 6,3 = 674 \text{ watts;}$$

para esta carga, la curva de tara del motor indica un rendimiento de 0,76; luego la potencia desarrollada en las poleas de las máquinas, que mide la suma de las pérdidas mecánicas y electromagnéticas, es:

$$674 \times 0{,}76 = 512 \text{ watts,}$$

o sea, para cada una de las máquinas:

$$\frac{512}{2} = 256 \text{ watts.}$$

Resulta, pues, que utilizándose la máquina como generador, el rendimiento es:

$$\frac{110\,(35 - 0{,}93)}{110 \times 35 + 332{,}5 + 256} = 0{,}84.$$

III. — Prueba de recepción de motores

Estas pruebas se refieren, lo mismo que para los generadores: 1.°, a la resistencia de aislamiento; 2.°, a la resistencia de los aisladores a la rotura (rigidez electrostática); 3.°, al calentamiento; 4.°, a la sobrecarga; 5.°, a la autorregulación, y 6.°, al rendimiento.

Todas estas pruebas se hacen del mismo modo que hemos visto para las dinamos consideradas como generadores.

Los valores admitidos para la sobrecarga, según los distintos reglamentos, son:

Asociación francesa de propietarios de máquinas de vapor. — El 20 % durante la décima parte de la duración de la prueba de calentamiento, y para los motores de marcha prolongada el 40 % durante tres minutos. Los motores deben poder soportar durante cinco minutos una velocidad superior a la normal en un treinta por ciento.

Unión francesa de sindicatos de electricidad. —Los mismos valores que para las dinamos consideradas como generadores. Para los motores de tracción o de marchas intermitentes, el 25 % durante un cuarto de hora, y el 50 % durante cinco minutos. El exceso de velocidad que han de poder resistir es del 50 % de la velocidad normal durante cinco minutos.

Instituto americano. —Excepción hecha de los motores de tracción o de servicio intermitente, el 25 % durante dos horas y el 50 % durante un minuto.

Asociación de electricistas alemanes.—El 40 % durante tres minutos.

Regulación. —Para los motores de velocidad constante, la regulación es el cociente que resulta de dividir la diferencia que hay entre la velocidad en vacío y la velocidad en plena carga, por esta última velocidad. Es decir, que llamando V_v a la velocidad en vacío y V_c a la velocidad en plena carga, la regulación tiene por valor el cociente:

$$\frac{V_v - V_c}{V_c}.$$

CAPÍTULO IX

Defectos y accidentes en las máquinas de corriente continua

Puede suceder que una máquina presente defectos desde su construcción o al cabo de cierto tiempo de estar funcionando. Vamos a estudiar en este capítulo la manera de descubrir la clase de defecto, observando el funcionamiento de la máquina; el punto en que se ha producido, y el modo de remediarlo.

Un defecto en la máquina o en alguno de sus órganos anejos, como reostatos, por ejemplo, o un error de montaje, se manifiesta generalmente por uno de los siguientes efectos:

1.º chispas entre el colector y las escobillas,

2.º calentamiento anormal del inducido,

3.º imposibilidad de cebar la máquina (generador) o de arrancar (motor); dificultad para el arranque aun de vacío, o velocidad excesiva.

I. Chispas entre el colector y las escobillas. — Las causas de estas chispas pueden ser muy variadas, como se especifica a continuación.

a) *Mala posición de las escobillas.* — Desviando convenientemente las escobillas se llega al cabo de algunos tanteos a encontrar la posición en que desaparecen las chispas.

b) *Carga excesiva.* — Es fácil comprobar con un amperímetro que la máquina produce una corriente mayor que la máxima para que se ha construído.

c) *Mal contacto de las escobillas con el colector.* — Este defecto se presenta casi siempre que se cambian las escobillas; para remediarlo se rodea el colector con un papel de vidrio de modo que la parte del vidrio quede afuera, y se apoyan fuertemente las escobillas contra el colector y se da al papel un movimiento de vaivén de manera que las superficies de contacto de las escobillas tomen exactamente la forma del colector.

d) *El colector no gira en redondo.* — También se dice que el colector está descentrado.

e) *El aislador (mica generalmente) sobresale por entre las láminas del colector.*

f) *Las láminas del colector no están bien apretadas.*

En estos tres últimos casos las escobillas vibran mucho durante la marcha, y para ver de cuál de ellas se trata, basta observar detenidamente el colector. En los dos primeros casos, hay que tornear el colector; en el tercero, se vuelve a montar, y después se tornea.

Este torneado debe hacerse con una herramienta bien afilada que pueda cortar el cobre y la mica; la velocidad de rotación debe ser bastante pequeña, de unos 15 cm. por seg. en la periferia, y la herramienta no ha de avanzar más de 0,1 de milímetro por vuelta. Después de tornear el colector, se quita con mucho cuidado toda traza de limadura o recorte de cobre, y se pulimenta la superficie con papel de vidrio fino sobre el cual se han echado de antemano unas cuantas gotas de aceite, o mejor aún, con una tela de carborundo.

g) *La excitación es demasiado débil.* — Si la máquina funciona como generador, se ve que entre las escobillas hay una tensión muy pequeña para la velo-

cidad normal, o bien que hay una velocidad excesiva para una tensión normal, en caso de funcionar la máquina como motor. Las causas de este defecto pueden ser las siguientes:

1.ª El regulador de inducción está quemado o desconectado.

2.ª Rotura del devanado inductor.

Estos dos defectos se pueden descubrir fácilmente, pues no se producen chispas entre los topes del reostato de excitación cuando se pasa la maneta de uno a otro, además de que la resistencia del circuito, medida con el ohmímetro, es infinitamente grande.

3.ª Conexiones defectuosas entre los devanados de los diferentes carretes inductores. — En este caso no hay flujo alguno en el inducido si la máquina es bipolar y no se encuentra resistencia ninguna para hacer girar a mano el inducido en vacío. Si la máquina es multipolar, para saber si hay algunas conexiones defectuosas se acerca una aguja imanada a las piezas polares sucesivas, viéndose si se suceden convenientemente los polos N y S; pero es preferible, a ser posible, emplear un galvanómetro balístico y un carrete pequeño plano. En el caso de una máquina multipolar, hay asimetría en la distribución del flujo a través del núcleo del inducido, y se producen corrientes de circulación que calientan el devanado inducido cuando la máquina es movida como generador en vacío.

4.ª Cortocircuitos en los circuitos inductores. — La corriente de excitación es demasiado intensa, y en consecuencia, se produce un calentamiento anormal en los inductores: se puede comprobar fácilmente este defecto midiendo la corriente y la resistencia de los circuitos inductores.

Si la máquina es bipolar, las chispas no se producen generalmente entre el colector y las escobillas, pero

serán considerables en el caso de una máquina multipolar.

5.ª Contactos de los circuitos inductores con la masa. — Si se produce un contacto entre el circuito inductor y la masa en un solo punto, no queda perturbado, en general, el buen funcionamiento de la máquina; pero si se produce otro contacto, una parte de este circuito se pone en cortocircuito, viéndose, como antes, que saltan chispas en las escobillas al mismo tiempo que se observa un calentamiento excesivo en los inductores. Cuando la máquina está derivada en una red que tiene un hilo a tierra (tracción o distribución de tres hilos con el hilo neutro a tierra) estos fenómenos se manifiestan con un contacto con la masa en un solo punto.

Se descubre fácilmente este defecto con un ohmímetro derivado entre uno de los bornes del inductor y el árbol de la máquina.

6.ª Contacto entre el devanado shunt y el devanado serie (máquina compound). — Este contacto puede

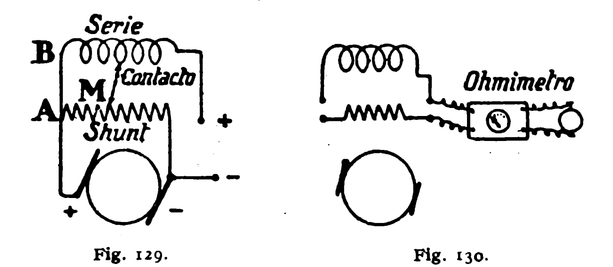


Fig. 129. Fig. 130.

tener por efecto poner en cortocircuito una parte más o menos grande de espiras del devanado shunt, como se ve en la figura 129, y se observan los mismos defectos de funcionamiento que en el caso anterior. Es fácil hacer la comprobación derivando un ohmímetro entre un extremo del circuito inducido y un extremo del circuito inductor (fig. 130).

h) *Conexiones defectuosas entre las escobillas y los circuitos de los polos auxiliares de conmutación.* —Los polos auxiliares crean un flujo suplementario dirigido en un sentido tal que perjudica la conmutación en vez de facilitarla; para remediar este defecto basta cambiar las conexiones entre estos circuitos y las escobillas (véase página 38).

i) *Rotura de un conductor inducido.* — Si la máquina está alimentada como motor, se produce una chispa muy fuerte que a veces da la vuelta al colector, y se ve que al parar la máquina, hay algunas láminas ennegrecidas y muy atacadas. Si la máquina se mueve como generador, se la excita separadamente, se la hace girar en vacío y se ve que se producen las mismas chispas que en el caso de un motor.

Esta rotura puede producirse en una conexión en el colector o en una sección. Para descubrir cuál es la sección rota se procede del modo siguiente: se unen las dos escobillas a un generador de corriente, unos cuantos acumuladores, por ejemplo, a través de un reostato y un amperímetro, y se hace girar lentamente el inducido a mano (fig. 131). En el momento en que la lámina del colector en que se encuentra la conexión rota pasa por una de las escobillas, se ve que no pasa corriente alguna por el amperímetro. Esta escobilla no debe tocar más que una lámina.

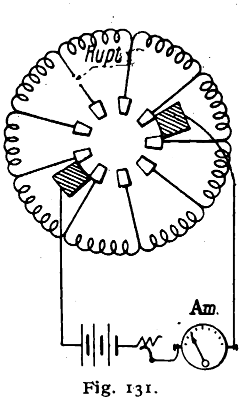


Fig. 131.

Si, después de una vuelta completa del colector, no se ha encontrado ninguna posición en que el amperímetro no marque corriente, es señal de que la rotura está en una sección.

En estas condiciones, estando aún las escobillas unidas a un generador, como acabamos de indicar, se corre a lo largo del colector un sistema de dos escobillas aisladas, separadas una de otra por un espesor igual al de una lámina del colector y entre los bornes de este sistema hay intercalado un voltímetro muy sensible. Se ve fácilmente (fig. 132) que cuando estas dos escobillas comprenden entre sí una sección cortada, la indicación del voltímetro sube de pronto, marcando el valor de la diferencia de potencial aplicada.

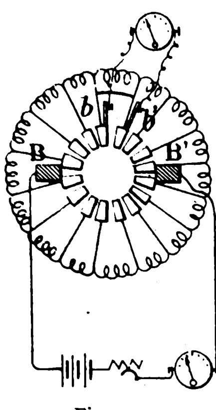


Fig. 132.

II. Calentamiento anormal del inducido. — En los casos anteriores hemos tratado de las causas de calentamiento anormal del inducido, acompañado de chispas en las escobillas.

Este accidente puede producirse también sin chispas, y las causas pueden ser las que siguen.

a) *Escobillas demasiado apretadas contra el colector.* — En este caso el calentamiento se hace por el colector.

b) *Cortocircuito en las espiras inducidas.* — Si la máquina funciona como generador, no se ceba; excitada separadamente, no puede dar su tensión normal, absorbe en circuito abierto una potencia excesiva y al cabo de muy poco tiempo el inducido se calienta, notándose olor a quemado.

Si la máquina funciona como motor, arranca lentamente, por sacudidas, y el calentamiento y olor a quemado no tardan en presentarse.

Para descubrir la espira que está en cortocircuito,

se unen las dos escobillas *B*, *B'* a un generador y se corren a lo largo del colector dos escobillas auxiliares *b*, *b'*, distantes entre sí una longitud igual al espesor de una lámina, aisladas y unidas a un voltímetro sensible. Cuando se llega a las dos láminas entre las cuales se encuentra la espira en cortocircuito, el voltímetro

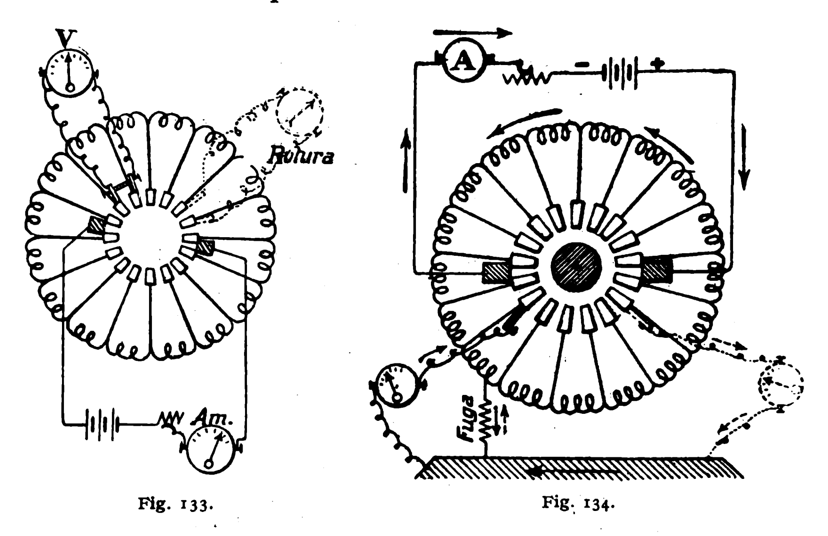


Fig. 133. Fig. 134.

marca cero (fig. 133) o un voltaje menor que entre las demás láminas.

El cortocircuito puede estar hecho por la masa de la máquina. Para descubrir un contacto entre el inducido y la masa, se procede del modo siguiente: se alimenta, como antes, el circuito inducido con un generador bien aislado, y después se dispone un voltímetro entre la masa (árbol o caja) y una lámina del colector, por medio de una escobilla. Si existe el defecto, se ve que se desvía la aguja del voltímetro; entonces se corre la escobilla sobre el colector hasta que la desviación cambie de sentido, en cuyo momento se pasa por la lámina unida a la sección puesta a masa (fig. 134).

III. Imposibilidad de cebar la máquina (generador) o de arrancar (motor). 1.º GENERADOR. —Las causas de este defecto pueden ser:

a) *El magnetismo remanente ha desaparecido, a causa, por ejemplo, del mal sentido de rotación del inducido.* — Basta unir los bornes del circuito inductor a un generador (unos cuantos acumuladores, por ejemplo) para que la máquina adquiera de nuevo su excitación remanente.

b) *La máquina se mueve en mal sentido.* — Para comprobarlo se dispone entre las escobillas un voltímetro de pequeño alcance, y se pone la maneta del reostato de campo en el punto muerto. El voltímetro marca la f. e. m. debida al magnetismo remanente; se suprimen entonces poco a poco las resistencias del reostato; si se ve que la f. e. m. disminuye, es señal de que la corriente producida por la máquina en los inductores tiende a disminuir la imanación remanente, y en este caso es preciso cambiar el sentido de rotación de la máquina o invertir la imanación remanente por medio de un generador, varios acumuladores, por ejemplo.

c) *Rotura o cortocircuito en las espiras inducidas.* — La máquina excitada separadamente y movida con su velocidad normal da una tensión demasiado pequeña, y el inducido se calienta rápidamente. En este caso puede asegurarse que hay un cortocircuito en las espiras inducidas. Este defecto se descubre como ya hemos dicho anteriormente. Si la máquina excitada separadamente da la tensión normal con producción de grandes chispas, es que hay una rotura en el inducido, y el punto defectuoso se descubre como ya hemos dicho.

2.º MOTOR. a) *El motor no arranca, ni en vacío, cuando se pone la maneta del reostato de arranque sobre el primer tope.* — Si se sigue corriendo la maneta, el motor

toma de pronto una velocidad considerable, produciéndose chispas muy grandes en las escobillas.

La causa de estos fenómenos es que no hay corriente en el circuito inductor, que está interrumpido en el reostato de campo, o en el devanado inductor, o que los circuitos de los carretes que componen este devanado están mal conectados y dos carretes consecutivos son de la misma polaridad.

Este defecto se descubre como ya hemos dicho anteriormente.

b) *El motor no arranca en carga.* — En vacío, se pone en marcha lentamente si se le ayuda con la mano, y sin producción de chispas adquiere su velocidad de régimen cuando se suprimen las resistencias del reostato de arranque.

El reostato de arranque está mal conectado, estando en serie con el inducido y el inductor.

c) *La corriente en el inducido es cero,* aunque se avance la maneta del reostato de arranque; el circuito está cortado en el reostato.

d) *El motor arranca bruscamente cuando la maneta del reostato de arranque se corre sobre unos cuantos topes.* — Ni aun en vacío, comienza a marchar el motor antes de esta posición de la maneta. La causa consiste en que una de las resistencias del reostato está rota.

CAPÍTULO X

Alternadores

Representación esquemática. — Consideremos un alternador cuyas piezas polares *r*, *r*, *r*... estén provistas de carretes montados en serie, por ejemplo, como se ve en la figura 135; los extremos del circuito inductor son los dos bornes *A*. El inducido es movido por la polea *E*, y sobre las dos anillas *B*, *B'* se apoyan las dos escobillas *P* y *P'* unidas al circuito exterior.

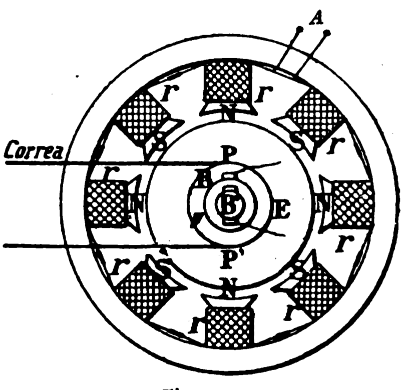


Fig. 135.

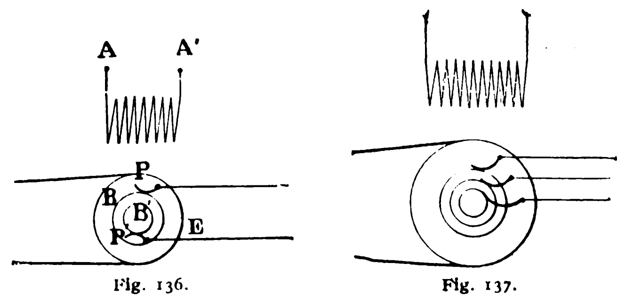


Fig. 136.

Fig. 137.

En lo que sigue representaremos esquemáticamente un alternador del modo indicado en la figura 136, aun-

que en general los inductores constituyen la parte giratoria. Un alternador trifásico se representará del modo que se ve en la figura 137.

I. — Alternador monofásico

a) **Característica en vacío o en circuito abierto.** — Esta curva se traza como para las máquinas de

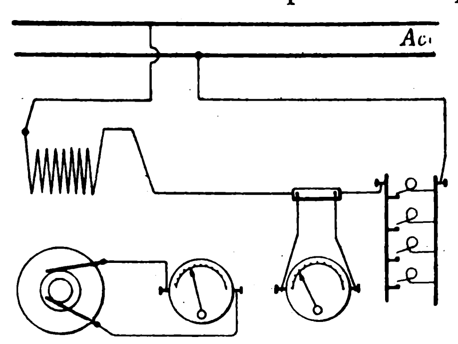


Fig. 138 (*Ac*, línea alimentada por acumuladores).

corriente continua. En el circuito inductor se intercala un amperímetro con un reostato de lámparas, por ejemplo; y entre los bornes del alternador se deriva un voltímetro para corrientes alternas, a ser posible electromagnético; el alternador se mueve con su velocidad de régimen, que se mantiene constante (fig. 138). Para cada valor de la corriente de excitación se

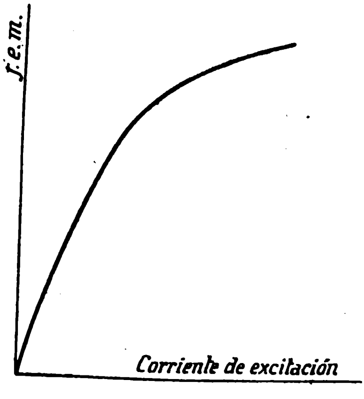


Fig. 139.

lee la f. e. m. eficaz del alternador, obteniéndose así

una curva de la misma forma que para las máquinas de corriente continua (fig. 139).

El valor de la fuerza electromotriz eficaz desarrollada entre los bornes de un alternador es de la forma:

$$E = \frac{KpNn\Phi}{10^8} \text{ volts;}$$

donde N es la velocidad en vueltas por segundo, n el número de conductores inducidos, p el de pares de polos, Φ el flujo útil por polo, y K un coeficiente cuyo valor depende del tipo de alternador. De aquí se deduce que la característica es también la curva que da el magnetismo del alternador.

b) **Característica en cortocircuito.** — Por muy pequeña que sea la resistencia interior de un alternador, es a veces posible cerrarlo en cortocircuito, lo cual no se podría hacer con un generador de corriente continua sin producir en el inducido una corriente de intensidad peligrosa. En efecto, el circuito inducido tiene un coeficiente de autoinducción $\mathcal{L}$ elevado y por lo tanto una reactancia bastante grande $2\pi N\mathcal{L}$ (siendo N la frecuencia de la corriente producida $N = p\,N_1$, donde p es el número de pares de polos y N_1 la velocidad en vueltas por segundo); en cortocircuito, la corriente tiene por valor eficaz el siguiente:

$$I_{cc} = \frac{E_0}{\sqrt{r^2 + 4\,\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}};$$

donde E_0 es la f. e. m. eficaz desarrollada; r es muy pequeña, pero $2\pi N\mathcal{L}$ es bastante elevado para que si se emplea una corriente débil para la excitación, la corriente producida no sea mucho mayor que la corriente normal. Con una corriente de excitación

igual aproximadamente a $^1/_8$ de la corriente que da en vacío la tensión normal, la corriente producida en cortocircuito es casi igual a la corriente normal.

Para trazar la característica en cortocircuito, se cierra el alternador sobre un amperímetro de poca resistencia y se hace aumentar poco a poco la corriente de excitación. La característica se obtiene tomando como abscisas los valores de la corriente de excitación y como ordenadas los valores correspondientes de la corriente de cortocircuito.

Es inútil mantener constante la velocidad, porque la intensidad de la corriente es independiente de la velocidad, ya que esta corriente tiene por valor eficaz:

$$I_{cc} = \frac{E_0}{\sqrt{r^2 + 4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2}}.$$

Como r^2 es muy pequeña y despreciable en comparación de $4\pi^2 N^2 \mathcal{L}^2$, se tiene con gran aproximación:

$$I_{cc} = \frac{E_0}{2\pi N \mathcal{L}}.$$

Ahora bien, E_0 es de la forma:

$$E_0 = \frac{KpNn\Phi}{10^8};$$

luego resulta en definitiva:

$$I_{cc} = \frac{KpNn\Phi}{2\pi N \mathcal{L} \times 10^8} = \frac{Kpn\Phi}{2\pi \mathcal{L} \times 10^8}.$$

En esta igualdad se ve que la corriente es independiente de la velocidad.

La gráfica que se obtiene de este modo empieza por ser rectilínea, debido a que la corriente de cortocircuito es proporcional a la corriente de excitación mien-

tras el hierro está lejos de su saturación. Cuando el hierro se va acercando a la saturación, la característica se desvía hacia el eje de las abscisas (figura 140).

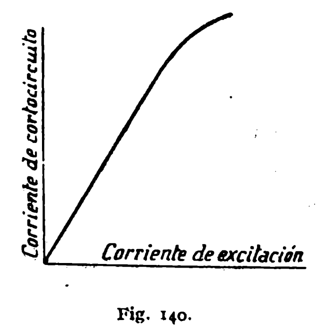


Fig. 140.

c) **Resistencia del inducido.** — Esta resistencia se mide, como la del inducido de una máquina de corriente continua, mediante una resistencia de comparación, y de aquí en adelante la llamaremos r.

d) **Impedancia y reactancia interiores.** — Tracemos con los mismos ejes coordenados la característica en cortocircuito. Para una corriente i de excitación, medida por OA, la f. e. m. desarrollada por la máquina es E_0 dada por AM (fig. 141); para esta misma excitación i la corriente producida por la máquina cerrada en cortocircuito es I_{cc} medida por AN. Pero sabemos que:

$$(1) \qquad I_{cc} = \frac{E_0}{\sqrt{r^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2}},$$

siendo ω la pulsación ($\omega = 2 \pi N$); luego la impedancia interior es:

$$\sqrt{r^2 + \mathcal{L}^2 \omega^2} = \frac{E_0}{I_{cc}} = \frac{AM}{AN}.$$

Conociendo r, se deduce la reactancia $\mathcal{L}\omega$:

$$\mathcal{L}\omega = \sqrt{\left(\frac{AM}{AN}\right)^2 - r^2}.$$

La forma de estas curvas nos dice que los valores de la impedancia y de la reactancia interiores del alternador dependen de la corriente de excitación.

Repitiendo para distintos valores de la corriente de excitación estas construcciones y cálculos, se obtiene la curva que representa la impedancia interior en función de la excitación.

Fig. 141.

OBSERVACIÓN I. — La relación (1) puede escribirse del modo siguiente:

$$E_0^2 = r^2 I_{cc}^2 + \mathcal{L}^2\omega^2 I_{cc}^2,$$

donde rI_{cc} es la caída óhmica en el inducido, $\mathcal{L}\omega I_{cc}$ la f. e. m. de autoinducción producida en el inducido, y sabemos que esta última está defasada 90° sobre la corriente (tomo I, página 398). Por consiguiente, E_0 está medida por la longitud de la hipotenusa del triángulo rectángulo ABC cuyos catetos son AB que mide rI_{cc} y BC que mide $\mathcal{L}\omega I_{cc}$; claro está que siendo muy pequeño r en comparación de $\mathcal{L}\omega$, el lado AB será también muy pequeño respecto al BC (fig. 142).

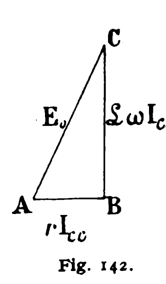


Fig. 142.

OBSERVACIÓN II. — Cuando hemos dicho que el coeficiente de autoinducción del inducido es $\mathcal{L}$, admitimos que este coeficiente tiene un valor determinado, constante, independiente de la corriente I. Ahora bien, esto no es cierto más que cuando el circuito mag-

nético sobre que se cierran las líneas de fuerza creadas por la corriente en el inducido está lejos de su saturación; pero en cuanto este circuito se satura, dicho coeficiente varía considerablemente con I, y no podemos hablar del coeficiente de autoinducción, ni de la reactancia, ni de la impedancia del inducido, porque estas magnitudes varían al variar la corriente producida. Supongamos, en efecto, que el circuito magnético de que hemos hablado esté saturado: si se hace aumentar la corriente I, el flujo aumenta y la curva que representa las variaciones del flujo con la corriente tiene la forma que se ve en la figura 143. Esta curva empieza por ser casi una línea recta para pequeños valores de I, y después se inclina hacia el eje de las abscisas cuando al aumentar I se satura el circuito magnético. Por consiguiente, si para una corriente pequeña I_1 medida por OA el flujo es Φ_1 medido por AM, el coeficiente de autoinducción es $\mathcal{L}_1$, y cumple con la condición:

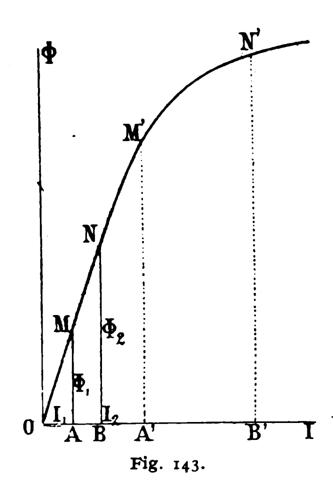


Fig. 143.

$$\Phi_1 = \mathcal{L}_1 I_1.$$

Para otro valor de la corriente, tal como I_2 medido por $O\ B$, el flujo es Φ_2 medido por BN y el coeficiente de autoinducción $\mathcal{L}_2$ es tal que se verifica:

$$\Phi_2 = \mathcal{L}_2 I_2.$$

Dividiendo ordenadamente estos dos valores del flujo:

$$(1) \qquad \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{\mathcal{L}_1 I_1}{\mathcal{L}_2 I_2}.$$

De los triángulos semejantes OAM y OBN, se deduce:

$$\frac{AM}{BN} = \frac{OA}{OB}$$

o sea:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{I_1}{I_2}. \qquad (2)$$

Y comparando las igualdades (1) y (2), se ve que:

$$\frac{\mathcal{L}_1 I_1}{\mathcal{L}_2 I_2} = \frac{I_1}{I_2}, \text{ de donde } \mathcal{L}_1 = \mathcal{L}_2.$$

Es fácil ver que esta igualdad no se cumple ya, cuando la corriente I alcanza un valor medido por OA'.

Como las líneas de fuerza, del flujo creado por la corriente inducida, se cierran a través de los polos inductores, se deduce que la reactancia y la impedancia del inducido no son constantes en general, por estar ordinariamente muy saturado el circuito magnético del inductor.

e) **Característica en carga.**—Esta curva representa las variaciones de la tensión eficaz entre los bornes del alternador al variar la intensidad eficaz de la corriente producida en un circuito exterior para valores dados de la corriente de excitación, de la velocidad y del factor de potencia del circuito exterior. Se puede obtener directamente esta curva si se dispone de una potencia motriz suficiente para mover el alternador en estas condiciones, y de receptores que puedan absorber la energía desarrollada. En este caso se encuentran los alternadores de poca potencia o los alternadores de gran potencia, ensayados después de su montaje, y por consiguiente acoplados a los motores que han de mover en lo sucesivo.

Se forma un circuito exterior constituído por resistencias óhmicas sin autoinducción o de autoinducción despreciable, y en paralelo con estas resistencias se ponen carretes de autoinducción de resistencia óhmica despreciable y cuyo coeficiente $\mathcal{L}$ se pueda variar introduciendo más o menos en su interior núcleos de hierro. En este circuito se dispone un amperímetro A y un wattímetro W_m, y entre los bornes del alternador se coloca un voltímetro V, como se ve en la figura 144.

La corriente de excitación i se mantiene constante y el alternador se mueve con su velocidad normal; el

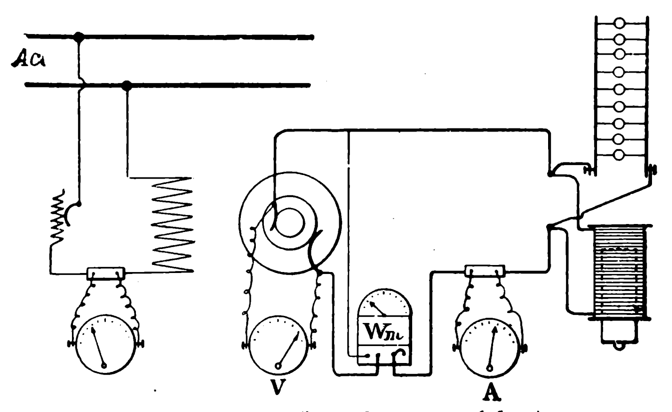


Fig. 144 (*Ac*, línea alimentada por acumuladores).

factor de potencia del circuito exterior está dado por la expresión $\frac{W}{UI}$, siendo W la potencia indicada por el wattímetro, y U e I las indicaciones respectivas de V y de A. Se regula la posición de los núcleos de hierro de modo que la relación $\frac{W}{UI}$ tenga un valor igual al factor de potencia dado, y manteniendo constante este valor, se hace variar la corriente I. Para

cada valor de I se lee el valor eficaz de la diferencia de potencial U y se traza una curva cuyas abscisas sean los valores de I y cuyas ordenadas sean los valores correspondientes de U.

Observación. — La corriente producida por la máquina, cuyo valor eficaz es I, es la suma geométrica de la corriente que pasa por el circuito no inductivo, de valor eficaz I_1, en fase con la diferencia de potencial U, y de la corriente en el circuito inductivo (carretes), cuyo valor eficaz es I_2 defasada 90° en atraso respecto a U (fig. 145), con la condición, por supuesto, de que este circuito tenga una resistencia óhmica despreciable y que la inductancia del primero sea también despreciable.

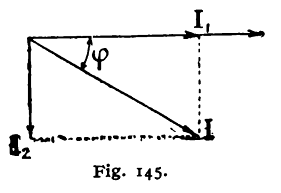


Fig. 145.

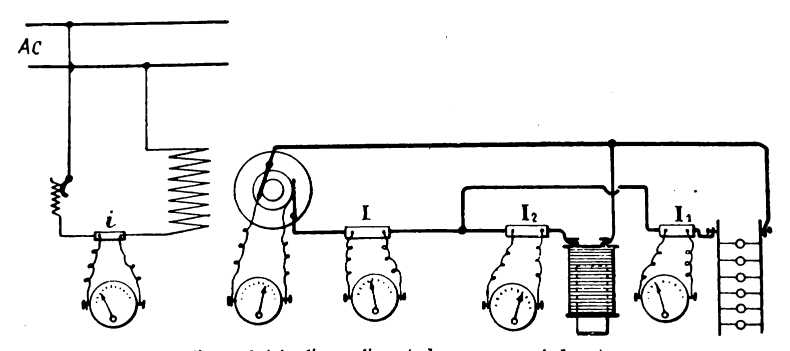


Fig. 146 (*Ac*, línea alimentada por acumuladores).

Por consiguiente, se ve que I_1 es la componente energética o wattada de I:

$$I_1 = I \cos \varphi$$

y que I_2 es la componente anergética o dewattada de I:

$$I_2 = I \operatorname{sen} \varphi.$$

Por lo tanto, se cumplirá la relación:

$$\frac{I_1}{I} = \cos\varphi$$

es decir, que el factor de potencia está medido por la relación entre las indicaciones I e I_1 de los amperímetros. El montaje es el representado en la figura 146.

Una vez conocido cos φ se puede hallar el valor de tg φ y proceder de modo que se tenga:

$$\frac{I_1}{I_2} = \operatorname{tg}\varphi.$$

f) **Caída de tensión.** — Se llama caída de tensión a la diferencia entre la fuerza electromotriz del alternador en vacío y la tensión en los bornes en carga, a igualdad de excitación. Si en condiciones dadas de excitación y velocidad, la f. e. m. es E, y si cuando la corriente del alternador pasa por un circuito exterior que reúna las dos condiciones dadas, la diferencia de potencial entre sus bornes es U, la caída de tensión es $E - U$.

A veces se expresa esta caída de tensión en tanto por ciento de la tensión entre los bornes, y en tal caso su valor es:

$$\frac{E - U}{U} \times 100.$$

g) **Determinación indirecta de la caída de tensión.** — Cuando se acaba de construir un alternador, y antes de salir de la fábrica, es útil conocer su funcionamiento, y sobre todo saber antes de entregarlo cuál será la caída de tensión en su interior cuando funcione en determinadas condiciones.

Generalmente, cuando se trata de alternadores de gran potencia, es imposible moverlos en carga, en la fábrica, por lo cual se ha buscado el modo de determi-

nar indirectamente la caída de tensión estudiándolos en condiciones especiales de funcionamiento que requieren una pequeña potencia. Los resultados dados por los diferentes métodos que exponemos a continuación no son rigurosamente exactos, pero sí lo bastante aproximados para hacerse cargo de la manera como funcionará el alternador en carga.

La caída de tensión interior es debida por una parte a la impedancia del circuito inducido, y por otra parte a la reacción del inducido, es decir, a la acción del flujo producido por las espiras inductoras. Esta acción, que ya hemos estudiado en las máquinas de corriente continua, es mucho más importante en los alternadores a causa del defasaje, que no existe en las corrientes continuas, por lo cual hay que estudiarlo antes que nada.

I. *Reacción del inducido en los alternadores.* — Para estudiar este fenómeno, supongamos los polos

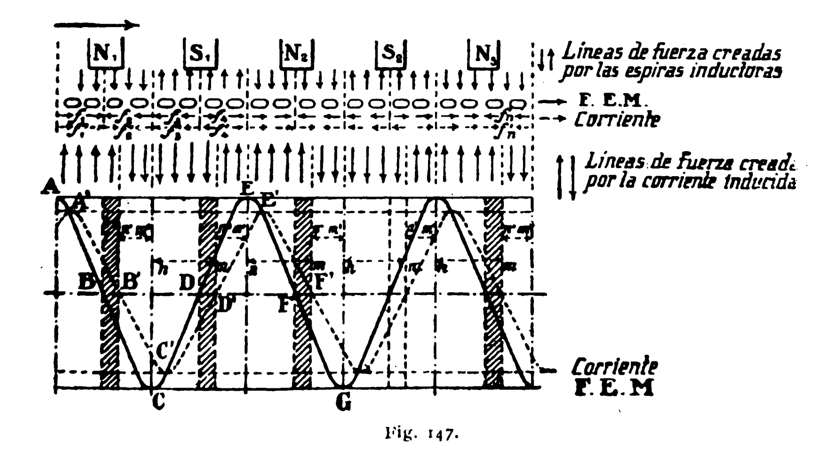


Fig. 147.

inductores N_1S_1, N_2S_2, N_3S_3... colocados sobre una misma recta (fig. 147), y una espira inducida que

se mueva frente a estos polos en la dirección de la flecha superior. La f. e. m. inducida en esta espira es nula cuando pasa frente a un polo, y máxima cuando pasa por la línea media del espacio que hay entre cada dos polos; esta f. e. m. cambia de sentido al pasar la espira por cada uno de los polos.

Este sentido, dado por la regla de Maxwell o del sacacorchos (tomo I, pág. 214), está indicado por las flechas f_1, f_2, f_3..., y la sinusoide *ABCDEF*... traduce estas variaciones de la f. e. m. inducida en la espira durante su movimiento.

La corriente en la espira está generalmente defasada en atraso respecto a esta fuerza electromotriz (este defasaje es producido por la autoinducción de los circuitos inducido y exterior); por consiguiente, las variaciones estarán representadas por la curva *A' B' C' D'* y el sentido de la corriente en las espiras es el indicado por las flechas f'_1, f'_2, f'_3...

Si se determina el sentido de los flujos creados por la corriente en estas espiras, se ve que en los intervalos *mn* la corriente inducida produce líneas de fuerza del mismo sentido que las del flujo inductor, mientras que en los intervalos *m'n'* son de sentido contrario; las primeras refuerzan el flujo inductor, mientras que las segundas lo disminuyen.

Como los intervalos *mn* son más anchos que los *m'n'*, el flujo disminuye, lo cual produce un descenso de tensión, de manera que la reacción del inducido da lugar a una verdadera caída de tensión.

Se ve fácilmente que si no hubiera defasaje entre la fuerza electromotriz y la corriente, los intervalos *mn* y *m'n'* serían iguales y la corriente en el inducido no tendría efecto alguno sobre la tensión en los bornes del alternador; al contrario, si la corriente estuviera defasada en adelanto sobre la fuerza elec-

tromotriz, los intervalos *mn* serían menores que los *m'n'*, y la reacción del inducido no produciría una caída, sino una elevación de tensión.

Observando el sentido de las líneas de fuerza creadas por la corriente en el inducido, se ve que se cierran a través del aire, o por el circuito magnético inductor del alternador (fig. 148), y se puede, refiriéndonos a los

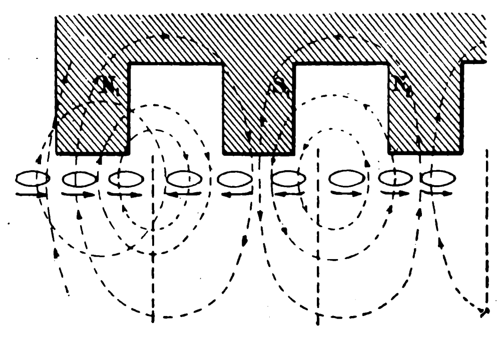


Fig. 148.

flujos producidos, considerar el total de espiras inducidas como formado de dos partes; unas dan flujos que se cierran a través del aire, es decir, sobre un circuito magnético no saturado, y las otras dan flujos que se cierran a través del circuito magnético inductor muy saturado. Las primeras tienen, como ya hemos visto (observación II, pág. 191), un coeficiente de autoinducción constante que llamaremos *coeficiente de dispersión*, y que designaremos con la letra *s*; la segunda hace disminuir el flujo principal producido por las espiras inductoras y a este efecto daremos el nombre de *reacción del inducido.*

II. *Caída de tensión.* — De lo que acabamos de exponer y sin entrar en el estudio de los efectos tan complejos de los flujos combinados de los circuitos

inductor e inducido, se puede decir que la caída de tensión se debe:

1.º a la resistencia óhmica r;

2.º a la autoinducción del inducido (coeficiente s);

3.º a la reacción del inducido.

1.º La caída óhmica tiene por valor $r\,I$ (siendo $\bar{I}$ la intensidad eficaz de la corriente producida) y está en fase con la corriente;

2.º La caída debida a la autoinducción s tiene por valor eficaz $2\pi NsI$ o sea $s\omega I$ (N es la frecuencia de la corriente y ω la pulsación, $\omega = 2\pi N$) y está defasada 90º en atraso respecto a la corriente (tomo I, página 398).

En el inducido se originan dos fuerzas electromotrices: una debida al flujo principal disminuído por la reacción del inducido, y cuyo valor eficaz representaremos por E_r y su valor instantáneo por e_r; la otra, debida al flujo creado por la corriente inducida y cuyas líneas de fuerza se cierran a través del aire, tiene por valor eficaz $s\omega I$, siendo por lo tanto su valor instantáneo igual a $s\omega i$. El conjunto de estas dos fuerzas electromotrices produce la corriente I en el circuito exterior, de manera que si u es la diferencia de potencial instantánea entre los bornes de la máquina, se tiene:

$$e_r + s\omega i = u + ri,$$
$$e_r = u + ri - s\omega i.$$

De aquí se deduce que la fuerza electromotriz producida por el flujo a través del inducido (flujo principal y flujo debido a la reacción del inducido, combinados) se halla sumando geométricamente u, ri, y $- s\omega i$. Supongamos por lo tanto que OA sea el vector de magnitud U_{ef} que representa la tensión u en los bornes; OB el vector de magnitud I_{ef} que representa la

corriente producida *i*, defasado sobre *OA* en un ángulo φ cuyo valor depende del circuito exterior; *ri* está representado por *Oc*, de longitud *rI*; *sωi* está defasado en atraso sobre *I* de modo que — *sωi* está representado

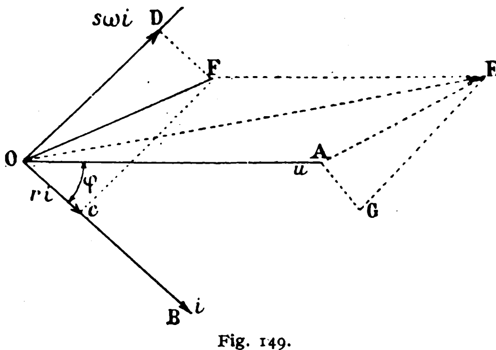


Fig. 149.

por un vector *OD* defasado 90° en adelanto sobre *OB* y de longitud igual a *sωI*. La resultante de *ri* y — *sωi* está representada por el vector *OF* que, compuesto con *u*, da la fuerza electromotriz eficaz E_r producida por el flujo resistente a través de las espiras inducidas (figura 149).

Esta fuerza electromotriz E_r puede obtenerse con

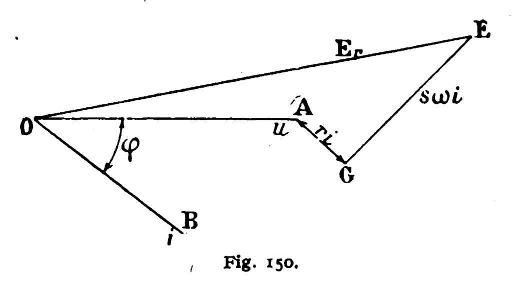


Fig. 150.

la siguiente construcción, que se deduce con gran facilidad de la anterior. Se traza por *A* una paralela *AG* a *OB*, y se toma sobre esta paralela una longitud igual

a rI; por G se traza una perpendicular a AG sobre la cual se toma una longitud GE igual a $s\omega I$; la recta OE mide la fuerza electromotriz E_r (fig. 150).

3.° *La reacción del inducido* tiene por efecto una disminución del flujo a través del inducido y del inductor. El flujo debido a los amperes-vueltas, y por consiguiente a la corriente de excitación, a través de las espiras inducidas varía periódicamente a causa del movimiento de estas espiras respecto a los polos, de manera que a causa del movimiento relativo de los circuitos inducido e inductor sucede como si la corriente inductora, que en realidad es continua, fuera alterna y de igual período que la corriente producida por el alternador, pues el período de esta corriente depende también de la velocidad del movimiento relativo de ambos circuitos. Es evidente, desde luego, que el valor eficaz de esta corriente ficticia es proporcional a la intensidad de la corriente continua real. Se puede decir que la reacción obra como si produjera amperes-vueltas inversos de los amperes-vueltas inductores y por lo tanto una corriente dirigida en sentido inverso de la de excitación. Ahora bien, esta corriente que hace disminuir a la inductora es evidentemente proporcional a la corriente producida por el alternador, siendo máxima o nula al mismo tiempo que esta última, es decir, que está en fase con ésta y puede representarse por mI, siendo m un factor que puede determinarse experimentalmente.

De aquí se deduce que el flujo que atraviesa las espiras inducidas y que produce la fuerza electromotriz E_r puede representarse por un vector cuya magnitud es la diferencia geométrica entre el vector que representa el flujo creado por la corriente inductora i_0 y el vector que representa el flujo creado por la corriente mI. Como las corrientes que producen estos

flujos están en fase con éstos, se puede decir que todo ocurre como si la fuerza electromotriz E_r estuviera producida por una corriente i_r representada por un vector cuya magnitud es la diferencia geométrica entre los vectores que representan i_0 y mI. Ahora bien, sabemos que una fuerza electromotriz está defasada 90° sobre el flujo que la produce, y por consiguiente sobre la corriente que crea el flujo, ya que esta fuerza electromotriz es máxima cuando el flujo es nulo, y nula

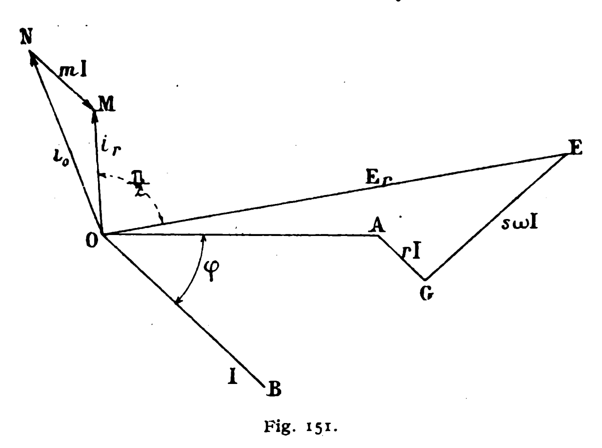


Fig. 151.

cuando el flujo es máximo. Por lo tanto, la corriente i_r está representada por un vector perpendicular al que representa a E_r; por otra parte, estando mI en fase con I, estará representada por un vector paralelo al que representa a I, de manera que i_r, mI, e i_0 están representados respectivamente por OM, MN, y ON, siendo OM perpendicular a OE, y MN paralela a OB (figura 151); este diagrama es debido a Potier, por lo cual lleva su nombre.

Con estas consideraciones preliminares podremos estudiar los diferentes métodos empleados para la determinación indirecta de la caída de tensión.

Diagrama de Behn-Eschenburg. — En el trazado de este diagrama se admite que el coeficiente de autoinducción del inducido es constante, es decir, que es independiente para una excitación dada de la corriente producida. En estas condiciones, la caída de tensión es debida a la caída óhmica rI y a la reactancia $\mathcal{L}\omega I$, estando dada esta reactancia, según hemos visto en la página 190, por una prueba hecha en cortocircuito; en resumen, que este procedimiento se reduce, refiriéndonos a lo que hemos dicho en los párrafos anteriores, a hacer $s = \mathcal{L}$ y $m = 0$, es decir, a admitir que las líneas de fuerza creadas por la corriente inducida se cierran todas a través del aire.

Sea U la tensión entre los bornes del alternador, I la corriente producida y φ el defasaje de la corriente sobre la tensión ($\cos\varphi$ es el factor de potencia del circuito exterior); U e I están representadas por dos

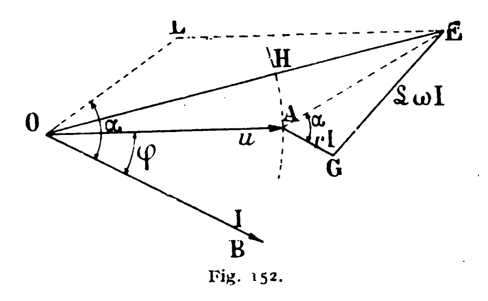


Fig. 152.

vectores OA y OB (fig. 152), rI por AG paralela a OB, y $\mathcal{L}\omega I$ por GE perpendicular a AG. La fuerza electromotriz de la máquina en las condiciones dadas de funcionamiento está medida por OE, de modo que la caída de tensión es, por definición:

$$OE - OA = HE.$$

El triángulo AEG puede obtenerse del modo que sigue: supongamos trazadas las características en vacío

y en cortocircuito I y II (fig. 153) y tomemos OR que mida la corriente de excitación i; la corriente de cortocircuito correspondiente I_{cc} está medida por RS y la fuerza electromotriz E por RT, de manera que, siendo r y $\mathcal{L}$ respectivamente la resistencia y el coeficiente de autoinducción del inducido, se tiene:

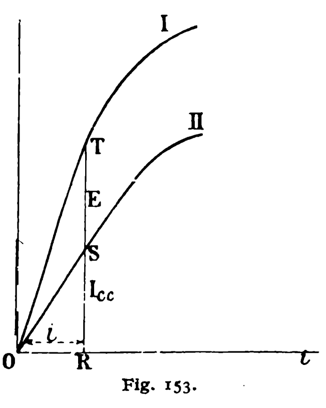


Fig. 153.

$$\sqrt{r^2 + \mathcal{L}^2\omega^2} = \frac{E}{I_{cc}} = \frac{RT}{RS},$$

de donde:

$$r^2 + \mathcal{L}^2\omega^2 = \left(\frac{RT}{RS}\right)^2.$$

En esta fórmula se ve que r y $\mathcal{L}\omega$ son los catetos de un triángulo rectángulo MNP (fig. 154) cuya hipotenusa es $\frac{RT}{RS}$. Para construir este triángulo se toma $MN = r$, se traza por N una perpendicular a MN y desde M como centro y con $\frac{RT}{RS}$ como radio se describe una circunferencia que cortará a la perpendicular a MN en P (RT y RS se miden sobre la figura 153, con las escalas adoptadas). La longitud NP mide $\mathcal{L}\omega$. El triángulo AGE (fig. 152) en que AG mide rI y GE mide $\mathcal{L}\omega I$ es semejante al MNP, por lo cual se podrá construir el triángulo AGE tomando $NM' = rI$ o bien $NM' = NM \times I$, y $NP' = \mathcal{L}\omega I$ o bien $NP \times I$; el lado $M'P'$ es igual a AE y el ángulo EAG es igual a $PMN = \alpha$ (fig. 154).

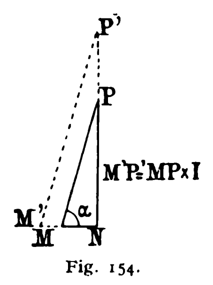


Fig. 154.

Por consiguiente, si por el punto O (fig. 152) se traza una paralela a AE y se toma $OL = AE$, y después

por L se traza la paralela a OA, esta última pasará por E; $LE = U$ y el ángulo BOL es igual a α. Al triángulo MNP se le llama *triángulo fundamental.*

Esta construcción permite resolver el problema siguiente:

Determinar la tensión en los bornes del alternador cuando éste produce una corriente I en un circuito exterior tal que el defasaje de la corriente sobre la tensión es φ, *siendo la corriente de excitación i.*

Estando trazadas las curvas I y II y siendo conocida i, se puede medir $I_{cc} = RS$ y $E = RT$ (fig. 153), luego se puede construir el triángulo MNP con lo cual se tiene el ángulo α. Hecho esto, se trazan dos rectas Ox y Oy que formen entre sí el ángulo dado φ; desde el punto O como centro se traza un círculo con $E{=}RT$ por radio, se traza por O una recta Oz que forme con Oy el ángulo α y sobre ella se toma una longitud OL igual a $M'P' = MP \times I$; por L se traza una paralela a Ox que corta a la circunferencia en E; la paralela a Oz trazada por E corta a Ox en A, y el segmento OA mide la tensión buscada (fig. 155).

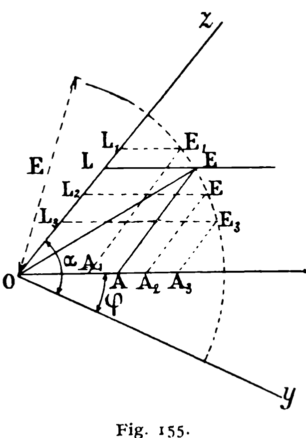


Fig. 155.

Para distintas corrientes I_1, I_2, I_3... que puedan darse, se toman sobre Oz valores iguales a $MP \times I_1$, $MP \times I_2$, $MP \times I_3$... y repitiendo la construcción que ha dado el punto A se obtienen los valores de la tensión en los bornes, correspondientes a estos valores de la corriente I; estas tensiones estarán medidas por OA_1, OA_2, OA_3. Tomando como abscisas los valores de I_1, I_2...

y como ordenadas los valores correspondientes de la tensión OA_1, OA_2..., se obtiene la característica en carga para las condiciones dadas de funcionamiento.

OBSERVACIÓN I. — Las corrientes de Foucault tienen por efecto producir una caída de tensión; en la práctica se tiene en cuenta esta caída admitiendo que es aproximadamente igual a la caída óhmica, de modo que en la construcción del triángulo *MNP* se tomará $NM = 2\,r$, ó $NM = 1{,}5\,r$ en vez de $NM = r$.

OBSERVACIÓN II. — Dada la hipotenusa que hemos

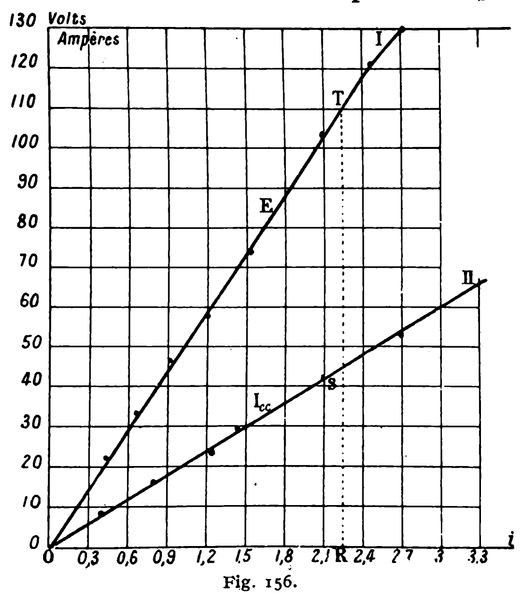


Fig. 156.

determinado para hacer el diagrama de Behn-Eschenburg, y habiéndose admitido que la totalidad de las espiras inducidas obraban como un carrete de autoinducción, se comprende que se tiene una reactancia $\mathcal{L}\omega$ demasiado elevada, sobre todo si el circuito magnético está saturado, por lo cual este método da caídas de tensión excesivas.

EJEMPLO. — a) *Resistencia del inducido* medida por comparación con una resistencia patrón: 0,33 ohm.

b) *Característica en circuito abierto.* — Está representada por la curva I (fig. 156) y se deduce de la tabla siguiente, resultado de la experimentación:

EXCITACIÓN			Tensión en los bornes	Velocidad en vueltas por minuto
Lecturas	Shunts	Amperes	E	
43	1	0,43	22	1300
65	»	0,65	33,5	»
93	»	0,93	47	»
12	10	1,20	58	»
15,5	»	1,55	73,5	»
21	»	2,10	102	»
27,5	»	2,75	130	»

c) *Característica en cortocircuito.*—Estando cerrado el alternador sobre un amperímetro de poca resistencia, se aumenta poco a poco la excitación desde 0 hasta 3,37 amperes, y se lee la corriente producida que indica el amperímetro. Los resultados obtenidos son los siguientes:

EXCITACIÓN			Corriente I_{cc}
Lecturas	Shunts	Amperes	
40	1	0,40	8,1
80,5	1	0,805	16
12,5	10	1,25	23
14,5	»	1,45	29
24,5	»	2,45	48
27	»	2,70	53
30	»	3,00	60
33,5	»	3,35	67

De esta prueba se ha deducido la curva II (figura 156).

Escalas de las ordenadas { curva I, 5 mm. por 10 volts
curva II, 5 mm. por 10 amperes }

d) *Triángulo fundamental.* — Supongamos que hay que estudiar el alternador para una corriente de excitación de $i = 2{,}25$ amperes; la f. e. m. medida por RT es $E = 110$ volts y la corriente de cortocircuito medida por RS es de 45 amperes. Por lo tanto, la impedancia interior es:

$$\frac{RT}{RS} = \frac{110}{45} = 2{,}44 \text{ ohms.}$$

Admitiremos que se tienen en cuenta las corrientes de Foucault multiplicando la resistencia interior por 1,5, y el triángulo fundamental MNP se construye tomando $MN = 1{,}5 \times 0{,}33 = 0{,}5$, y trazando desde M como centro un círculo de radio igual a 2,44 que cortará a la perpendicular a MN en el punto N, en P. La longitud NP leída en la escala de este gráfico da la reactancia $\mathcal{L}\omega = 2{,}39$ ohms. El ángulo $\alpha = NMP$ tiene por valor 78° (fig. 157).

P
2,44
2,39
78°
M
0,5
N

Fig. 157.

e) *Tensiones en los bornes del alternador para distintos valores de la corriente.*

1.° *El factor de potencia del circuito exterior es cos $\varphi = 1$.* Se traza un círculo (fig. 158) de radio $OA = E$ y se forma sobre OA un ángulo AOZ de 78°. Busquemos la tensión para las corrientes produci-

das 5, 10, 15, 20, 25, 30 amperes; los valores de $MP \times I$, o sea $2{,}44 \times I$ volts, son:

$$2{,}44 \times 5 = 12{,}20 \qquad 2{,}44 \times 10 = 24{,}4$$
$$2{,}44 \times 15 = 36{,}60 \qquad 2{,}44 \times 20 = 48{,}8$$
$$2{,}44 \times 25 = 61{,}00 \quad \text{y} \quad 2{,}44 \times 30 = 73{,}2.$$

Escalas: 2 volts por milímetro.

Sobre OZ, a partir de O, se llevan sucesivamente longitudes OL_1, OL_2, OL_3, OL_4, OL_5 y OL_6 que miden respectivamente 12,20, 24,4, etc. Por los puntos L que así resultan se trazan paralelas a OA, que cortarán

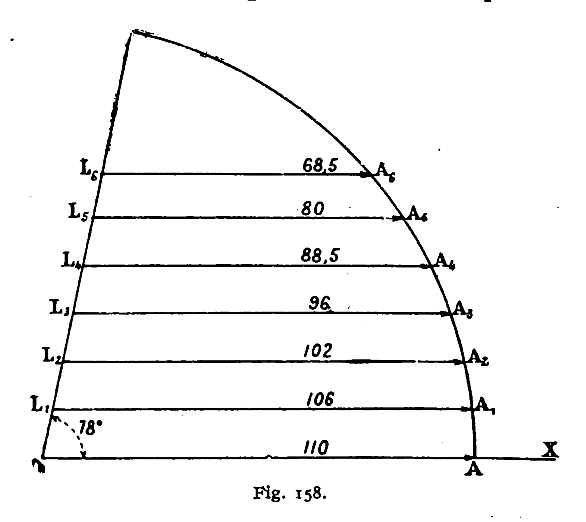
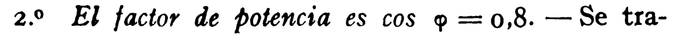


Fig. 158.

al círculo trazado, en A_1, A_2, A_3... A_6, y las longitudes L_1A_1, L_2A_2... L_6A_6 miden las tensiones en los bornes, correspondientes a las distintas corrientes 5, 10... 30 amperes; de este modo se encuentra 106; 102; 96; 88,5; 80 y 68,5 volts. Tomando como abscisas los valores de la corriente y como ordenadas los valores correspondientes de las tensiones así medidas, se obtiene la característica en carga I para $i = 2{,}25$, y para $\cos \varphi = 1$ (véase la figura 159).



2.º *El factor de potencia es cos* $\varphi = 0{,}8$. — Se tra-

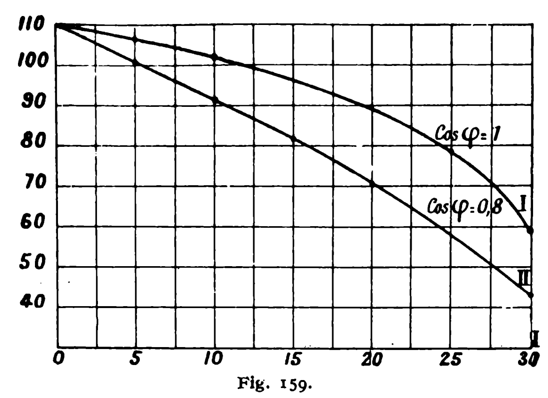


Fig. 159.

zan (fig. 160) dos rectas OX y OY que formen entre sí el ángulo φ. Luego se traza OZ que forme con OY un

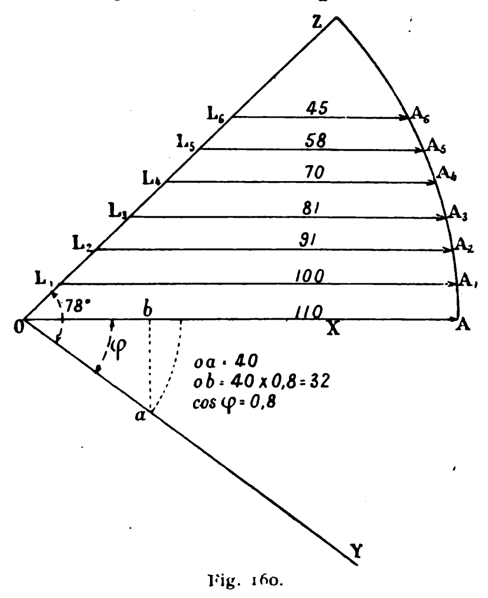


Fig. 160.

ángulo de 78° y se toman sobre OZ las longitudes OL_1, OL_2... OL_6 respectivamente iguales a 12,20; 24,4; 36,6;

48,8; 61; 73,2. Por los puntos L se trazan paralelas a OX y se obtienen sobre el círculo de radio OA que mide 110 volts los puntos A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 y A_6, y las longitudes tales como L_1A_1 miden las tensiones buscadas. Con los valores de estas tensiones se puede trazar la característica en carga II para $i = 2{,}25$ y $\cos \varphi = 0{,}8$ (véase la figura 160).

Diagrama de Rothert. — Al contrario de lo admitido para hacer el diagrama de Behn-Eschenburg, se

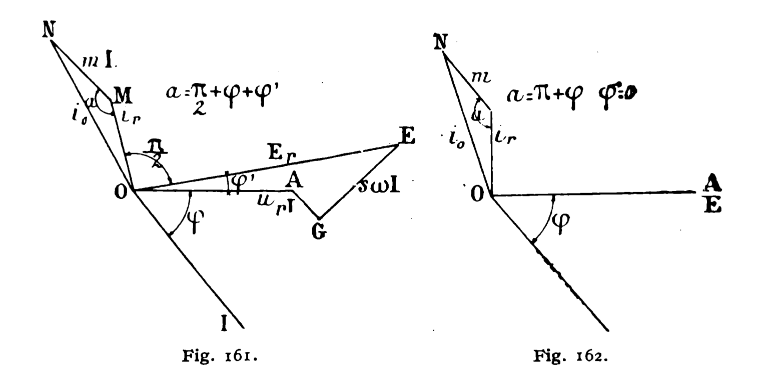


Fig. 161. Fig. 162.

admite en éste que el flujo producido por los amperes-vueltas inducidos pasa todo por el circuito magnético, de tal modo que la caída de tensión sería debida únicamente a lo que hemos llamado reacción del inducido. Por consiguiente, si refiriéndonos al diagrama de Potier (fig. 161) despreciamos la caída óhmica $r\,I$, que es muy pequeña, este diagrama queda modificado del modo que sigue: la caída de tensión debida a $r\,I$ y a $s\omega I$ es nula, siendo toda debida a mI, por lo cual OE se confunde con OA, OM es perpendicular a OA, de modo que el ángulo OMN es igual a $\frac{\pi}{2} + \varphi$, y por otra parte i es la intensidad de la corriente de excitación

que produce una f. e. m. igual a la tensión en los bornes del alternador (fig. 162).

Con este diagrama se puede encontrar la corriente de excitación i_0 para la cual la tensión entre los bornes del alternador es U, si puede determinarse el valor de mI. Ahora bien, si se cierra el alternador en cortocircuito y si se le hace producir la corriente I, la tensión en los bornes será nula, la f. e. m. desarrollada será igual a la caída de tensión interior, y por consiguiente, según la hipótesis que hemos hecho, los flujos debidos a los amperes-vueltas inductores e inducidos son iguales y opuestos. Por lo tanto, si la corriente de excitación necesaria para obtener en cortocircuito la corriente I es i_0', se tiene: $mI = i_0'$. De aquí se deduce la solución del problema siguiente:

Un alternador debe producir una corriente I, con una tensión U, siendo el factor de potencia del circuito exterior φ; se quiere saber cuál debe ser la corriente de excitación y cuál será la caída de tensión.

1.º Se traza la característica en vacío y se determina cuál es la corriente de excitación i_r para la cual la f. e. m. es la dada U (fig. 163).

2.º Se traza la característica en cortocircuito y se determina cuál es la corriente de excitación i_0' a que corresponde la corriente de cortocircuito dada I.

Una vez hecho esto, se trazan dos vectores PM y MN de longitudes que midan i_r y i_0' en una escala determinada y que formen entre sí un ángulo igual a $\frac{\pi}{2} + \varphi$, estando dado φ desde luego. El vector resultante PN mide, en la misma escala, la corriente de excitación buscada i_0, y llevando este valor sobre el eje de las abscisas de la característica en vacío,

$OD = PN$, se obtiene para la ordenada DR la f. e. m. E, y la caída de tensión es:

$$E - U = DR - OS = RV.$$

El triángulo PMN puede construirse sobre el primer diagrama trazando por A una recta que forme con la ordenada de A el ángulo φ, y tomando sobre esta

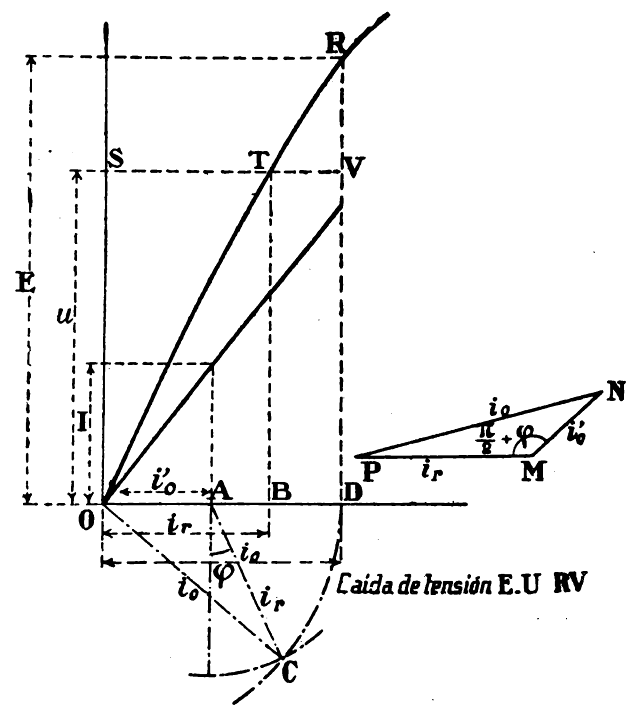


Fig. 163.

recta un segmento $AC = OB$, el segmento OC mide i_0. Llevando OC sobre el eje de las abscisas se tiene el punto D y la f. e. m. DR.

Ejemplo. — Con los resultados de los ensayos en vacío y en cortocircuito efectuados en el alternador

anteriormente estudiado al tratar del diagrama de Behn-Eschenburg, se han determinado, aplicando el diagrama de Rothert, las caídas de tensión para las condiciones de funcionamiento siguientes:

a) $U = 80$ volts $I = 25$ amperes $\cos \varphi = 1,0$

b) $U = 80$ volts $I = 25$ amperes $\cos \varphi = 0,8$.

La construcción (fig. 164) en que $AC = AC' = OB$, da:

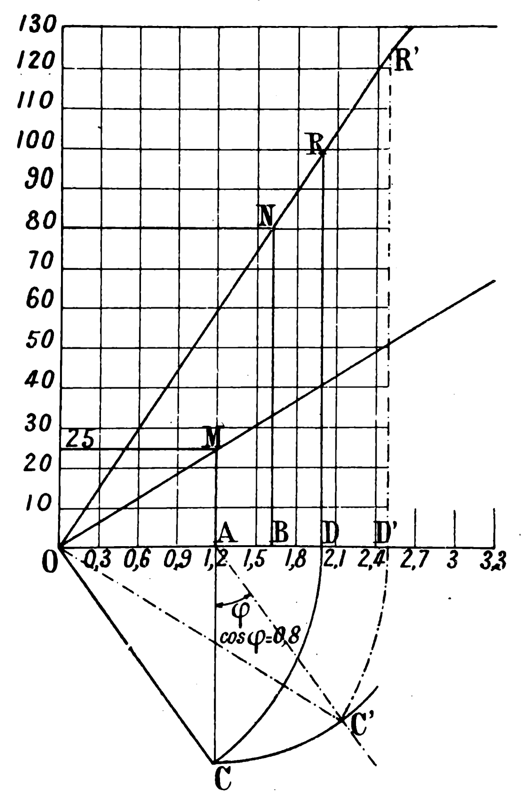


Fig. 164.

Para el primer caso, una corriente de excitación medida por $OC = OD$, o sea de 1,98 amperes, y una caída de tensión de 19 volts ($DR - BN$).

Para el segundo caso, una corriente de excitación medida por $OC' = OD'$ o sea de 2,49 amperes, y una caída de tensión de 42 volts ($D'R' — BN$).

El diagrama de Behn-Eschenburg ha dado, para las condiciones de funcionamiento de este primer caso: $U = 80$, $I = 25$ y $\varphi = 0$, una corriente de excitación de 2,25 amperes y una caída de tensión de 30 volts.

El diagrama de Rothert da caídas de tensión menores que el de Behn-Eschenburg. Se demuestra que el primero da valores menores y el segundo mayores de los verdaderos, por lo cual se podría adoptar un valor medio.

OBSERVACIÓN. — En este último diagrama no se ha tenido en cuenta la caída óhmica rI, pero no es difícil hacerlo, y en tal caso el diagrama queda modificado del modo siguiente (fig. 165):

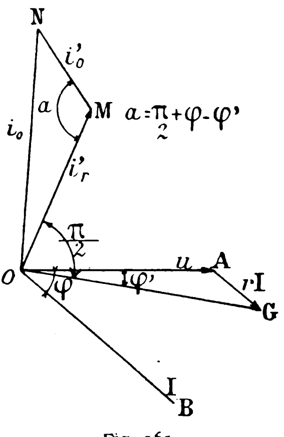


Fig. 165.

OA y OB representan U e I; se traza AG paralela a OB, de longitud rI, y se traza OG. La longitud OG se mide con la escala adoptada y se lleva sobre el eje de ordenadas de la característica en vacío, y la abscisa correspondiente mide i'_r. Sobre una perpendicular a OG se toma OM igual a i'_r, por M se traza una paralela a OB sobre la cual se toma MN igual a i'_0, que es la corriente de excitación que en cortocircuito da la corriente I, y ON mide la corriente de excitación i_0 (figura 165).

Diagrama de Potier. — Para establecer el diagrama de Potier, que da la corriente de excitación i_0 necesa-

ria para obtener una diferencia de potencial U cuando el alternador produce una corriente I con un defasaje φ, hay que determinar experimentalmente los valores de mI y de $s\omega I$.

Para ello se admite que estos valores son los mismos cualquiera que sea el defasaje de la corriente sobre la tensión, siendo muy cómodo determinarlos cuando el defasaje es de 90°, es decir, cuando la corriente producida está completamente dewattada. Con este objeto se traza *la característica en dewattada.*

Característica en dewattada. — La característica en dewattada se obtiene haciendo que la corriente del

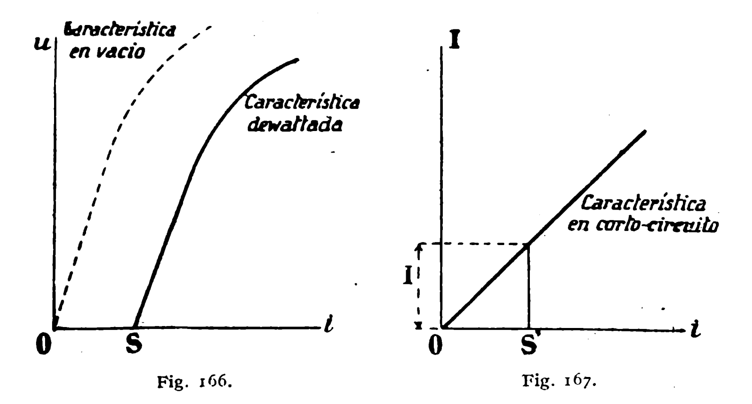


Fig. 166. Fig. 167.

alternador pase por carretes de autoinducción regulable, cuya resistencia óhmica sea pequeña respecto al coeficiente de autoinducción. Se mantiene la intensidad de la corriente que debe producir el alternador constantemente en el valor I, y se hace variar la excitación i, anotando para cada valor de la excitación la diferencia de potencial U en los bornes. La característica en dewattada es la curva en que cada punto tiene por abscisa la corriente de excitación y por ordenada

la diferencia de potencial correspondiente, y tiene la forma indicada en la figura 166; más adelante veremos que esta curva es semejante a la característica en vacío. Sea S el punto en que dicha curva corta al eje de las abscisas; la longitud OS mide la corriente de excitación a que corresponde una tensión nula, es decir, para la cual, siendo la resistencia del circuito exterior nula, la corriente producida es I, luego $OS = OS'$ es la abscisa del punto de la característica en cortocircuito cuya ordenada mide I (fig. 167).

En estas condiciones particulares, la corriente está defasada 90° sobre la tensión aproximadamente (lo estaría con toda exactitud si los carretes y el circuito del inducido tuvieran una resistencia nula). El diagrama de Potier ya conocido (pág. 203, fig. 151) está

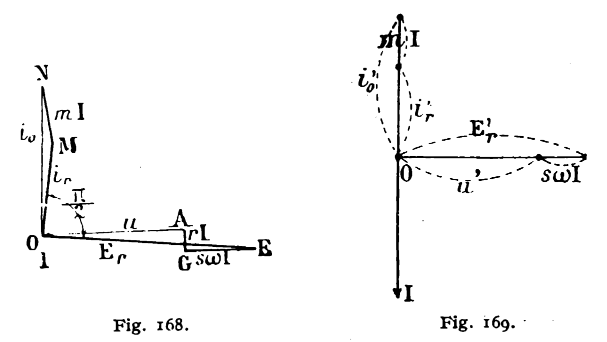


Fig. 168. Fig. 169.

dado en este caso por la figura 168. Como rI es muy pequeño y despreciable comparado con $s\omega I$, y el ángulo φ puede considerarse como igual a 90°, este diagrama es con mucha aproximación el representado en la figura 169, teniéndose:

$$E'_r = U' + s\omega I \qquad (1)$$

y, además,

$$i'_0 = i'_r + mI \qquad (2)$$

siendo i'_0 la corriente de excitación necesaria para que el alternador produzca la corriente completamente dewattada I bajo la tensión U', e i'_r es la corriente de excitación necesaria para obtener en vacío una f. e. m. igual a $E_r = U' + s\omega I$.

Sean respectivamente I y II la característica en vacío y la característica en dewattada (fig. 170); tome-

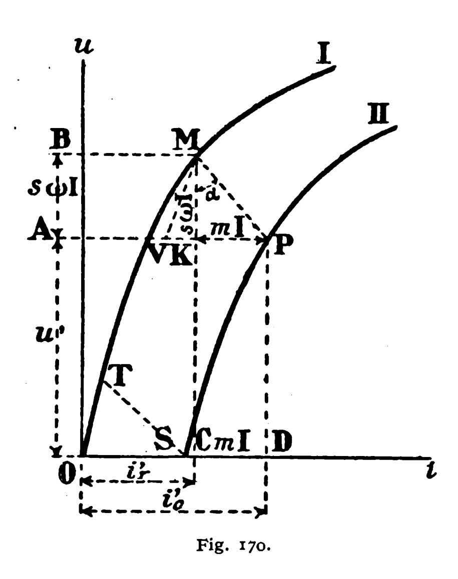


Fig. 170.

mos $OA = u'$, valor cualquiera de la tensión en dewattada correspondiente a una corriente de excitación i_0, y $A\ B = s\omega I$; de la igualdad (1) se deduce inmediatamente:

$$E'_r = OA + AB = OB.$$

La abscisa del punto M de la característica en vacío cuya ordenada es OB, es i'_r, medida por OC; la abscisa del punto P de la característica en dewattada cuya ordenada es OA mide i'_0, puesto que i'_0 es la excita-

ción a que corresponde una diferencia de potencial igual a u' cuando el alternador produce la corriente dewattada I. Por lo tanto, se tiene:

$$MK = s\omega I \quad \text{y} \quad PK = mI,$$

ya que $PK = CD = OD - OC = i'_0 - i'_r$, y en virtud de la igualdad (2) $i'_0 - i'_r = mI$; por consiguiente:

$$\overline{MP}^2 = MK^2 + PK^2 = I^2(s^2\omega^2 + m^2) \quad \text{y} \quad \operatorname{tg}\alpha = \frac{mI}{s\omega I} = \frac{m}{s\omega}.$$

Se ve, por lo tanto, que MP y tg α son constantes, porque I se mantiene invariable y m y $s\omega$ son independientes de la corriente de excitación. De aquí resulta que a cada punto M de la característica en vacío corresponde un punto P de la característica en dewattada obtenido del modo siguiente: por M se traza una recta que forme con la paralela al eje de las ordenadas un ángulo α tal que tg $\alpha = \frac{m}{s\omega}$, y sobre esta recta se toma una longitud MP que cumpla con la siguiente condición:

$$MP = I\sqrt{s^2\omega^2 + m^2}.$$

Esta longitud MP es constante, puesto que la característica en dewattada se ha trazado manteniendo constante la corriente I; luego la curva II no es más que la curva I trasladada en la dirección MP.

Por consiguiente, si se pueden obtener dos puntos correspondientes tales como M y P, la paralela al eje de las abscisas trazada por P y la paralela al eje de las ordenadas trazada por M se cortarán en un punto K tal que MK medirá $s\omega I$ y PK, mI. Sea en particular T el punto de la característica en vacío correspondiente al punto S de la característica en dewattada;

la recta ST es igual y paralela a PM. La curva I es rectilínea en una longitud bastante grande a partir de O, luego trazando por M una paralela MV a OT, el triángulo MVP obtenido es igual al OST, y PV resulta ser igual a OS.

Las constantes m y $s\omega$ se obtendrán del modo siguiente:

1.° se traza la característica en vacío I (fig. 171);

2.° se determina un punto (por encima del codo) de la característica en dewattada para la corriente I dada, tal como P;

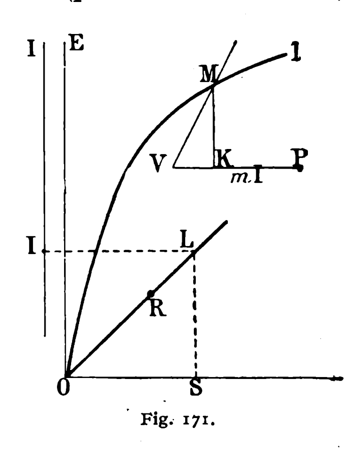


Fig. 171.

3.° se determina un punto R de la característica en cortocircuito.

Se traza OR, se determina sobre esta recta el punto L de ordenada I, siendo OS su abscisa. Por P se traza una paralela al eje de las abscisas sobre la cual se toma $PV = OS$, y por V se traza una paralela a la parte rectilínea de la característica en vacío, que cortará a esta curva en M. La ordenada de M corta a PV en K, y se tiene:

$$MK = s\omega I \quad \text{y} \quad PK = mI.$$

Estando determinados de este modo los valores de $s\omega I$ y de mI, se puede sin ninguna dificultad trazar el diagrama de Potier que dará la corriente i_0 de excitación para la cual el alternador produce la corriente I bajo la tensión U con un defasaje φ; una vez determinada i_0, la característica en vacío dará la f. e. m.

correspondiente E, y se tendrá la caída de tensión $E - U$.

Ejemplo. — Se trata de determinar la corriente de excitación necesaria para que un alternador sometido a ensayo produzca una corriente de 50 amperes bajo una tensión de 220 volts: 1.º, cuando el factor de potencia del circuito exterior es $\cos \varphi = 1$; 2.º, cuando este factor de potencia es igual a 0,8.

1.º *Trazado de la característica en vacío a la velocidad de régimen, 750 vueltas por minuto:*

Excitación i	Fuerza electromotriz E
2,2 amperes	44 volts
3,27 »	63,5 »
4 »	77 »
6,4 »	120 »
7,4 »	138 »
10,3 »	173 »
14,2 »	217 »
20,7 »	151 »
24,3 »	262 »
30 »	275 »

Esta característica es la curva indicada en la figura 172.

Escalas	ordenadas.	5 mm. para 20 volts
		5 mm. para 20 amperes
	abscisas. . .	5 mm. para 2 amperes.

2.º *Punto de la característica en cortocircuito:* excitación 10,6 amperes: corriente 93 amperes. — Sea R este punto.

3.º *Punto de la característica en dewattada para una corriente de 50 amperes:* excitación 24,3 amperes; tensión, 220 volts. — Sea P el punto obtenido de este modo.

4.º *Resistencia del inducido:* 0,2 ohms.

Determinación de mI y de sωI. — *L* es el punto de *OR* que tiene por ordenada 50 amperes, y por abscisa 5,8 amperes. Por *P* se traza una paralela al

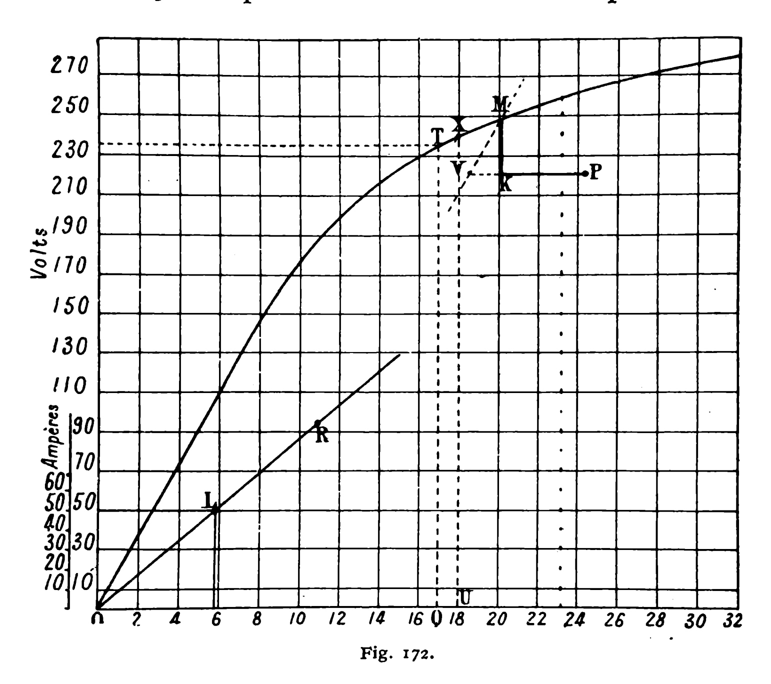


Fig. 172.

eje de las abscisas, sobre la cual se toma $PV = 5{,}8$; la paralela a la parte rectilínea de la característica en vacío trazada por *V* cortará a esta curva en un punto *M*, cuya ordenada corta a *PV* en *K*. Luego se tiene:

$$s\omega I = MK = 29 \text{ volts}$$
$$mI = PK = 4{,}1 \text{ amperes.}$$

Diagrama (fig. 173).

1.º $I = 50$, $U = 220$, $\cos \varphi = 1$. Escalas: 1 mm. para 4 volts y 1 mm. para 0,4 amperes.

OA mide 220 volts, AG es igual a $0{,}2 \times 50 = 10$ volts y $GE = s\omega I = 29$ volts. El segmento OE medido con su escala correspondiente da 232 volts, que corresponden al punto T de la característica en vacío (fig. 172) y por consiguiente a la excitación medida por OQ,

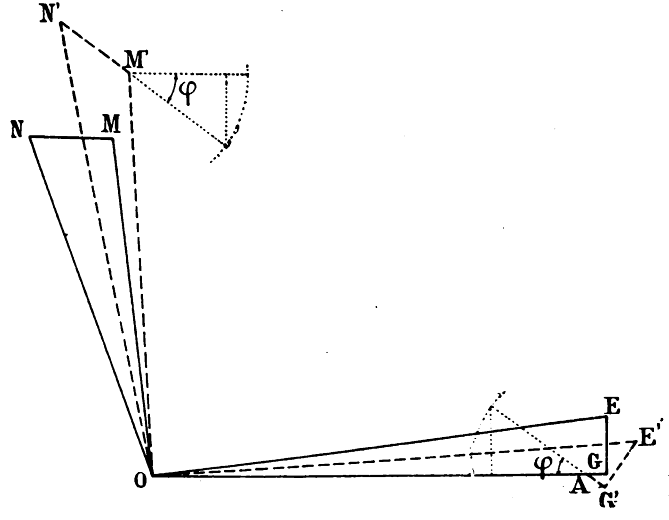


Fig. 173.

o sea a 17 amperes. OM, perpendicular a OE, mide 17 amperes, y MN, paralela a OA, mide 4,1 amperes; la longitud ON medida con su escala da 18 amperes, que corresponden a 240 volts (punto X). La corriente de excitación debe ser, por lo tanto, de 18 amperes: la f. e. m. es de 240 volts, y la caída de tensión será:

$$240 - 220 = 20 \text{ volts,} \qquad \text{o sea} \qquad \frac{20 \times 100}{220} = 9\ \%.$$

2.º $I = 50$, $U = 220$, $\cos\varphi = 0{,}8$.

$AG' = 10$ volts, $G'E' = 29$ volts, OE' da 250 volts, correspondientes a una excitación de 20,4 amperes; OM', perpendicular a OE', mide 20,4 amperes, $M'N'$

mide 4,1 amperes y ON' medida con su escala da 23,2 amperes, que corresponden, según la característica en vacío, a una f. e. m. de 258 volts.

Por consiguiente se tiene: excitación, 23,2 amperes. Caída de tensión:

$$258 - 220 = 38 \text{ volts}, \quad \text{o sea} \quad \frac{38 \times 100}{220} = 17,3\ \%.$$

OBSERVACIÓN. — Cuando el alternador produce una corriente I_1 con una tensión U_1 y un defasaje φ_1 de I_1 sobre U_1, la potencia dada por este alternador es $W_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$. Se ve que la aplicación de estos métodos no requiere más que una pequeña potencia para el motor que mueve al alternador, porque en el trazado de la característica en vacío $I_1 = 0$, en el trazado de la característica en cortocircuito $U_1 = 0$, y en el trazado de la característica en dewattada $\cos \varphi = 0$, luego siempre se tiene $W_1 = 0$.

II. — Alternadores polifásicos

Todo lo anteriormente expuesto se aplica a los alternadores polifásicos: por ejemplo, se determina la caída de tensión en una fase de un alternador trifásico como si se tratara de un alternador monofásico.

Resistencia interior. — Sea a la resistencia, medida como se ha dicho para las máquinas de corriente con-

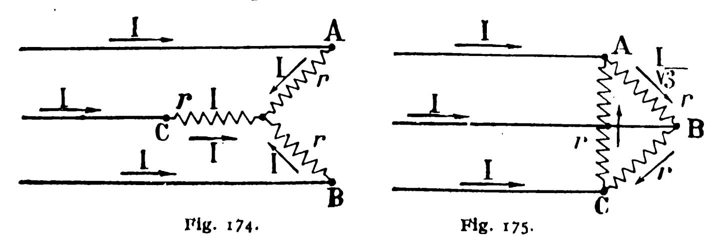


Fig. 174. Fig. 175.

tinua, entre dos bornes o dos anillas, y r la resistencia en cada fase.

Si el motor está montado en estrella (fig. 174), se tiene:

$$a = 2r, \quad \text{de donde} \quad r = \frac{a}{2}.$$

Si el alternador está montado en triángulo (figura 175), se tiene:

$$a = \frac{r \times 2r}{r + 2r} = \frac{2}{3}r, \quad \text{de donde} \quad r = \frac{3}{2}a.$$

Característica en vacío. — Se coloca un voltímetro entre dos bornes del inducido y se procede del mismo modo que para las máquinas monofásicas (fig. 176).

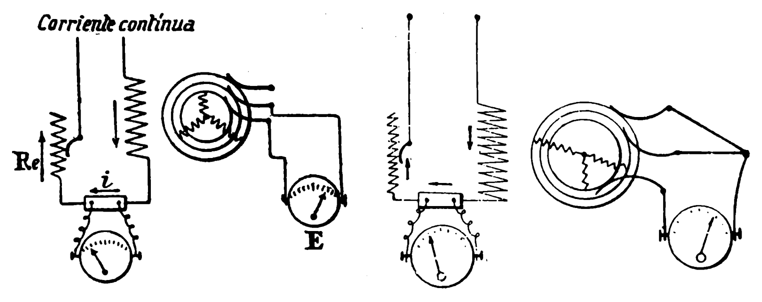


Fig. 176. Fig. 177.

Característica en cortocircuito. — Los circuitos que ha de alimentar el alternador están formados por amperímetros idénticos de poca resistencia; también puede emplearse un solo amperímetro y sustituir los otros por conductores de igual resistencia. De esta manera, en el caso de un alternador trifásico, se efectúa el montaje del modo indicado en la figura 177.

Característica en dewattada. — Se cierra el alternador sobre carretes de autoinducción idénticos o bien sobre motores asincrónicos que marchen en vacío.

Característica en carga. — Se cierra el alternador sobre circuitos de resistencia óhmica y reactancia variables, y tales que se pueda mantener constante, en

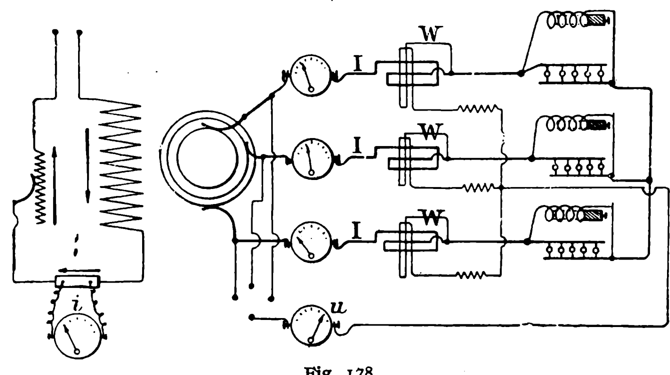


Fig. 178.

un valor dado, el factor de potencia de cada uno de ellos. Estas condiciones pueden realizarse formando cada uno de los circuitos con un reostato de lámparas sobre el cual se deriva un carrete de autoinducción

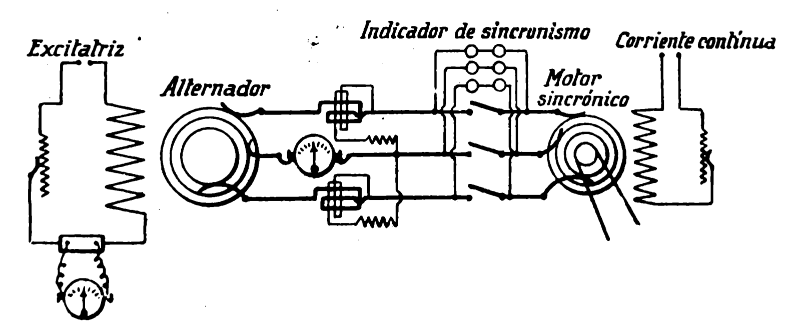


Fig. 179.

regulable. En cada circuito se dispone un wattímetro y un amperímetro, y entre los extremos de cada uno de ellos se monta un voltímetro (fig. 178).

También se puede hacer que la corriente del alter-

nador vaya a parar a un motor sincrónico cuya carga se hace variar, obteniéndose el factor de potencia conveniente regulando oportunamente la excitación del motor. El factor de potencia se obtiene disponiendo dos wattímetros como para la medida de las potencias por el método de los dos wattímetros (tomo II, pág. 241), véase figura 179.

Siendo idénticas las fases basta con un amperímetro en una de ellas. Las indicaciones α_1 y α_2 de los dos wattímetros permiten determinar el factor de potencia φ de cada circuito.

En efecto, consideremos, por ejemplo, un circuito receptor en estrella OA, OB, OC y sean u_1, u_2, u_3 las tensiones instantáneas entre el centro O y cada uno de los extremos A, B, C; sea U la tensión eficaz entre las líneas 1-2, 2-3, 3-1; I la intensidad eficaz de la

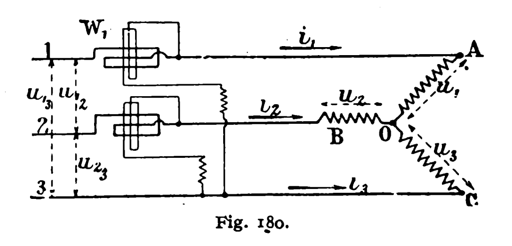


Fig. 180.

corriente en cada línea. La indicación del primer wattímetro (fig. 180) mide la cantidad UI cos φ_1, siendo φ_1 el defasaje entre la corriente i_1 y la tensión u_{13}; como la desviación de la aguja es α_1, se tiene:

$$UI \cos \varphi_1 = K\alpha_1.$$

Del mismo modo, el segundo wattímetro mide UI cos φ_2, siendo φ_2 el defasaje de la corriente i_2 sobre la tensión u_{23}, y se tendrá análogamente:

$$UI \cos \varphi_2 = K\alpha_2.$$

Dividiendo ordenadamente estas dos igualdades, resulta:

$$(1) \qquad \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}.$$

Representemos respectivamente por M, N, P las tensiones u_1, u_2, u_3, defasadas entre sí 120°; puesto que $u_{13} = u_1 - u_3$, la tensión u_{13} estará representada por el vector Q, que, como fácilmente se ve, forma un ángulo de 30° con el M (figura 181). Por estar la corriente i_1 defasada en el ángulo φ sobre la tensión u_1 (porque el factor de potencia del circuito de OA es $\cos \varphi$), el defasaje de i_1 sobre u_{13} es φ_1, y se ve que

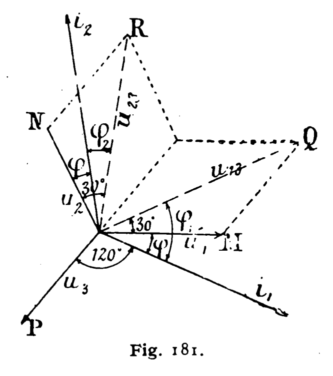


Fig. 181.

$\varphi_1 = 30 + \varphi$. Es fácil ver también que $\varphi_2 = 30 - \varphi$. Por consiguiente, la igualdad (1) se puede poner en esta otra forma:

$$\frac{\cos(30 + \varphi)}{\cos(30 - \varphi)} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}, \text{ o sea } \frac{\cos 30 \cos \varphi - \text{sen } 30 \text{ sen } \varphi}{\cos 30 \cos \varphi + \text{sen } 30 \text{ sen } \varphi} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

de donde:

$$\alpha_2 \cos 30 \cos \varphi - \alpha_2 \text{ sen } 30 \text{ sen } \varphi =$$
$$= \alpha_1 \cos 30 \cos \varphi + \alpha_1 \text{ sen } 30 \text{ sen } \varphi,$$

$$(\alpha_2 - \alpha_1) \cos \varphi \cos 30 = (\alpha_1 + \alpha_2) \text{ sen } \varphi \text{ sen } 30,$$

o sea:

$$\frac{\text{sen } \varphi}{\cos \varphi} = \frac{\cos 30}{\text{sen } 30} \cdot \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 + \alpha_1}$$

o también:

$$(2) \qquad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 + \alpha_1} = \sqrt{3}\, \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 + \alpha_1}.$$

Ahora bien, sabemos (tomo I, pág. 372) que:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}$$

y como tg φ se puede escribir en esta forma:

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3}\, \frac{1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$$

resulta que:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 3\frac{\left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2}{\left(1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2}}} = \frac{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}{\sqrt{\left(1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2 + 3\left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2}} =$$

$$= \frac{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}{2\sqrt{1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2}}.$$

Si el defasaje φ pasa de 60°, el ángulo $30 + \varphi$ pasa de 90°, y $\cos(30 + \varphi)$ es negativo, la desviación α_1 cambia de sentido, y en este caso se tiene:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}\sqrt{3}; \qquad \cos \varphi = \frac{1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}{2\sqrt{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2}}.$$

$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ positivo

$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$	cos φ	$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$	cos φ	$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$	cos φ
0,00	0,500	0,34	0,762	0,68	0,951
0,01	0,5075	0,35	0,769	0,69	0,955
0,02	0,5155	0,36	0,777	**0,70**	0,957
0,03	0,523	0,37	0,784	0,71	0,9605
0,04	0,531	0,38	0,790	0,72	0,9645
0,05	0,539	0,39	0,796	0,73	0,966
0,06	0,546	**0,40**	0,804	0,74	0,970
0,07	0,5545	0,41	0,810	0,75	0,9725
0,08	0,5626	0,42	0,8175	0,76	0,9745
0,09	0,5695	0,43	0,824	0,77	0,977
0,10	0,577	0,44	0,830	0,78	0,979
0,11	0,584	0,45	0,837	0,79	0,981
0,12	0,593	0,46	0,844	**0,80**	0,983
0,13	0,601	0,47	0,850	0,81	0,984
0,14	0,609	0,48	0,855	0,82	0,986
0,15	0,617	0,49	0,862	0,83	0,989
0,16	0,624	**0,50**	0,866	0,84	0,990
0,17	0,631	0,51	0,874	0,85	0,991
0,18	0,639	0,52	0,879	0,86	0,992
0,19	0,648	0,53	0,884	0,87	0,9935
0,20	0,655	0,54	0,888	0,88	0,9945
0,21	0,663	0,55	0,895	0,89	0,995
0,22	0,6715	0,56	0,900	**0,90**	0,997
0,23	0,679	0,57	0,905	0,91	0,9975
0,24	0,686	0,58	0,9095	0,92	0,998
0,25	0,695	0,59	0,9145	0,93	0,9986
0,26	0,7025	**0,60**	0,918	0,94	0,999
0,27	0,717	0,61	0,923	0,95	0,9995
0,28	0,7176	0,62	0,927	0,96	0,9995
0,29	0,725	0,63	0,932	0,97	»
0,30	0,732	0,64	0,935	0,98	»
0,31	0,740	0,65	0,9395	0,99	»
0,32	0,747	0,66	0,944	**1,00**	1,000
0,33	0,755	0,67	0,9475		

$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ negativo

$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$	cos φ	$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$	cos φ	$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$	cos φ
+ **0,00**	0,500	— 0,34	0,2738	— 0,68	0,112
— 0,01	0,493	— 0,35	0,2682	— 0,69	0,1054
— 0,02	0,485	— 0,36	0,2622	— **0,70**	0,1014
— 0,03	0,478	— 0,37	0,2572	— 0,71	0,0977
— 0,04	0,470	— 0,38	0,2512	— 0,72	0,0937
— 0,05	0,464	— 0,39	0,2458	— 0,73	0,0898
— 0,06	0,456	— **0,40**	0,2402	— 0,74	0,0860
— 0,07	0,449	— 0,41	0,236	— 0,75	0,0824
— 0,08	0,441	— 0,42	0,2298	— 0,76	0,0786
— 0,09	0,435	— 0,43	0,225	— 0,77	0,0749
— **0,10**	0,427	— 0,44	0,2196	— 0,78	0,0712
— 0,11	0,420	— 0,45	0,210	— 0,79	0,0676
— 0,12	0,414	— 0,46	0,209	— **0,80**	0,0645
— 0,13	0,406	— 0,47	0,2052	— 0,81	0,0606
— 0,14	0,400	— 0,48	0,1988	— 0,82	0,0572
— 0,15	0,392	— 0,49	0,194	— 0,83	0,0536
— 0,16	0,386	— **0,50**	0,1893	— 0,84	0,0502
— 0,17	0,379	— 0,51	0,1843	— 0,85	0,04675
— 0,18	0,3724	— 0,52	0,1796	— 0,86	0,0435
— 0,19	0,366	— 0,53	0,1748	— 0,87	0,0401
— **0,20**	0,359	— 0,54	0,1701	— 0,88	0,0368
— 0,21	0,353	— 0,55	0,1654	— 0,89	0,03356
— 0,22	0,3462	— 0,56	0,1609	— **0,90**	0,03038
— 0,23	0,340	— 0,57	0,1518	— 0,91	0,0272
— 0,24	0,3346	— 0,58	0,1504	— 0,92	0,0241
— 0,25	0,3278	— 0,59	0,1474	— 0,93	0,0210
— 0,26	0,3218	— **0,60**	0,143	— 0,94	0,0179
— 0,27	0,3142	— 0,61	0,1386	— 0,95	0,0148
— 0,28	0,3094	— 0,62	0,1345	— 0,96	0,0117
— 0,29	0,3032	— 0,63	0,130	— 0,97	0,0088
— **0,30**	0,2972	— 0,64	0,1259	— 0,98	0,0058
— 0,31	0,2920	— 0,65	0,1218	— 0,99	0,0029
— 0,32	0,2848	— 0,66	0,1176	— **1,00**	0,0000
— 0,33	0,2708	— 0,67	0,115		

Las tablas anteriores dan para los diferentes valores de $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ los valores correspondientes del factor de potencia cos φ, calculados con las dos fórmulas de la página 230.

OBSERVACIÓN. — En vez de dos wattímetros se puede emplear uno solo y un conmutador especial (véase tomo II, página 247).

Rendimiento de un alternador

I. **Medida directa.** — Este procedimiento se aplica cuando es posible mover el alternador con su velocidad de régimen a toda carga con un motor tarado.

Sean respectivamente U_1 volts e I_1 amperes la tensión en los bornes del motor y la corriente que lo atraviesa cuando el alternador funciona en las condiciones en que se quiere estudiar, es decir, siendo la tensión eficaz U, la corriente eficaz I y el factor de potencia del circuito cos φ.

La potencia tomada por el motor es U_1I_1 watts, y si para esta carga su rendimiento es ρ_1, la potencia trasmitida al alternador es:

$$W_1 = U_1I_1\rho_1.$$

Sea W_2 la potencia absorbida por la excitación y W la potencia comunicada por el alternador al circuito exterior; en estas condiciones, su rendimiento es:

$$\rho = \frac{W}{W_1 + W_2}.$$

Si el alternador es monofásico, se hace que la corriente que produce pase por un circuito en que se puedan realizar las condiciones de tensión, corriente y defasaje deseadas, comprobando estas condiciones con

un voltímetro, un amperímetro y un wattímetro, y se tiene:

$$W = UI \cos \varphi.$$

Si es trifásico, se hace el montaje (fig. 182) indicado para la determinación de la característica en carga, y resulta:

$$W = UI \sqrt{3} \cos \varphi.$$

Este procedimiento sólo se emplea en las casas constructoras para alternadores de poca potencia. Los alternadores de grandes dimensiones no pueden

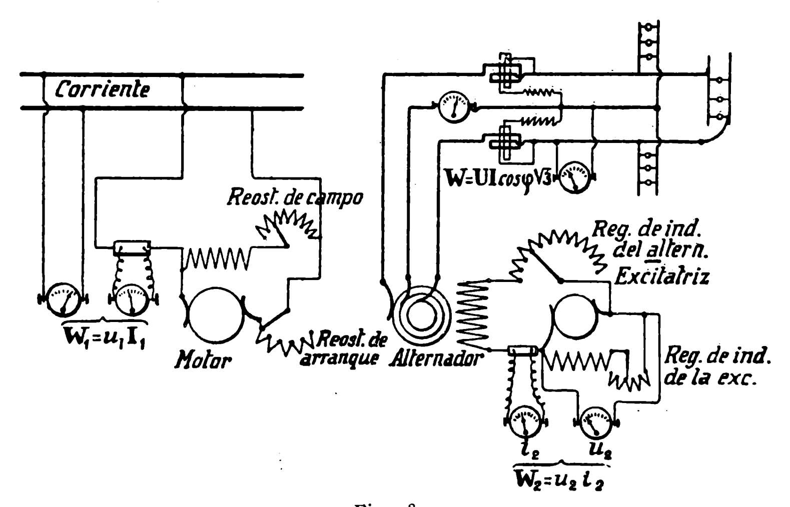


Fig. 182.

probarse de este modo, sino después de instalados definitivamente; entonces se hace que su corriente pase por resistencias metálicas generalmente formadas por placas delgadas sumergidas en agua corriente, o en reostatos líquidos formados por varillas metálicas también sumergidas en agua corriente.

II. **Medida indirecta. Método de las pérdidas separadas.** — Supongamos que se trata de determinar el rendimiento de un alternador que funciona en las siguientes condiciones: tensión, U volts; corriente, I amperes; defasaje, φ; y velocidad, N vueltas por minuto.

Si W expresa las pérdidas de potencia, el rendimiento será:

$$\rho = \frac{UI \cos \varphi}{UI \cos \varphi + W}.$$

Evaluación de las pérdidas. — La suma W de las pérdidas se compone:

1.º de las pérdidas mecánicas, rozamientos y ventilación, W_m;

2.º de las pérdidas por histeresis y corrientes de Foucault en vacío, W_{HF};

3.º de las pérdidas por la corriente inducida, debidas principalmente a las corrientes de Foucault W'_F;

4.º de las pérdidas por efecto Joule en el inducido, rI^2;

5.º de las pérdidas debidas a la excitación.

Para determinarlas se procede del modo siguiente:

a) Se mueve el alternador, sin excitar, en vacío con la velocidad N por medio de un motor de corriente continua tarado, y la potencia W_1 trasmitida al alternador mide la potencia W_m, es decir, que $W_1 = W_m$.

b) Se excita el alternador por la corriente necesaria para obtener las condiciones de funcionamiento dadas (esta corriente se determina de antemano por uno de los métodos antes estudiados, de Behn-Eschenburg, Rothert, Potier) y se le hace girar en vacío por el motor tarado; se lee la potencia W_2 trasmitida al alternador, y esta potencia W_2 mide la suma de W_m y W_{HF}, es decir, que

$$W_2 = W_m + W_{HF},$$

de donde:

$$W_{HF} = W_2 - W_m, \quad \text{o sea} \quad W_{HF} = W_2 - W_1.$$

c) Se cierra el alternador en cortocircuito y se regula la excitación de modo que produzca, a la velócidad N, la corriente I. Se lee la potencia W_3 trasmitida al alternador. Si se admite que la potencia perdida por las corrientes de Foucault debidas a la corriente en el inducido no depende más que de la intensidad de la corriente, y por lo tanto, es independiente de la excitación, la potencia W_3 mide la suma de las siguientes pérdidas: pérdidas mecánicas W_1, pérdidas por efecto Joule en el inducido rI^2 y pérdidas por corrientes de Foucault debidas a la corriente en el inducido I, de modo que se tiene:

$$W_3 = W_1 + rI^2 + W'_F,$$

de donde se deduce:

$$W'_F + rI^2 = W_3 - W_1.$$

La potencia W_3 no comprende las pérdidas por histeresis, porque estando el alternador en cortocircuito, el flujo en el inducido es nulo.

d) Se ve cuál es la tensión u necesaria en los bornes de la excitatriz para obtener la corriente de excitación i previamente determinada, y se obtienen las pérdidas debidas a la excitación:

$$W_4 = ui.$$

La suma de todas las pérdidas es:

$$W = W_m + W_{HF} + W'_F + rI^2 + ui,$$

o sea:

$$W = W_1 + W_2 - W_1 + W_3 - W_1 + W_4 =$$
$$= W_2 + W_3 + W_4 - W_1,$$

y el rendimiento es:

$$\rho = \frac{UI \cos \varphi}{UI \cos \varphi + W_2 + W_3 + W_4 - W_1}.$$

OBSERVACIÓN. — También se pueden obtener las pérdidas W_m moviendo el alternador como motor sincrónico excitado por la corriente que cuando el alternador gira en vacío da la tensión U; dos wattímetros, o un wattímetro y su inversor dan el valor de W_1 en el caso de un alternador trifásico. En el caso de un alternador monofásico basta con un solo wattímetro.

Pruebas de recepción. — Estas pruebas se hacen como para las máquinas de corriente continua.

EJERCICIOS

1.° Determinar la frecuencia de la corriente producida por un alternador en las siguientes condiciones: N, número de vueltas por minuto; $2p$, número de polos; la frecuencia f es igual a $p \frac{N}{60}$, y la pulsación $\omega = 2\pi f$.

Determinar directamente la frecuencia por el método siguiente (Sartori):

Se coloca verticalmente, mediante un peso, un alambre de latón de 0,4 mm. aproximadamente, que se pone de modo que toque con las aristas vivas de dos caballetes A, B, el primero de los cuales A es fijo, y el segundo B móvil (figura 183). Este alambre se pone en serie con una lámpara de incandescencia y es recorrido por la corriente cuya frecuencia se quiere hallar. Se dispone un electroimán de

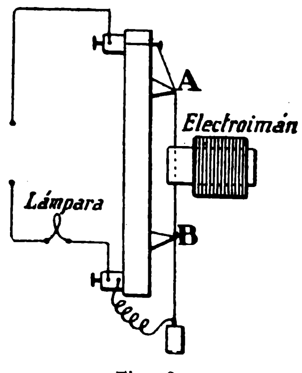


Fig. 183.

manera que el alambre pase por entre sus piezas polares, el cual entrará en vibración bajo la influencia de las acciones que se ejercen entre la corriente y el campo, porque cuando la corriente marcha en un sentido, el alambre es atraído en una cierta dirección, y cuando el sentido de la corriente se invierte, también se invierte el sentido de la fuerza que obra sobre el alambre. Se corre el caballete móvil *B* de modo que se obtenga la máxima amplitud, lo cual se consigue al cabo de algunos tanteos.

La frecuencia de la corriente está dada por la relación:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{P \times 981}{m}};$$

donde l es la distancia en centímetros entre los dos caballetes, P el peso en gramos que pende del alambre, y m el peso en gramos del alambre por cada centímetro.

2.º Medir la resistencia del inducido.

3.º Trazar la característica en vacío.

4.º Trazar la característica en cortocircuito.

5.º Deducir de estos trazados la reactancia y la impedancia interiores del alternador.

6.º Trazar la característica en carga y la curva de las caídas de tensión en función de las corrientes producidas, para los diferentes valores de cos φ:

a) por el método de Behn-Eschenburg;

b) por el método de Rothert;

c) por el método de Potier.

Comparar los resultados obtenidos.

7.º Determinar por una prueba directa las tensiones entre los bornes para algunos valores de la corriente con los mismos factores de potencia que para los métodos indirectos, y comparar los resultados obtenidos.

8.º Determinación del rendimiento para diversas cargas. Hallar la curva de los rendimientos para un factor de potencia dado.

CAPÍTULO XI

Transformadores

Representación esquemática. — Al tratar de transformadores monofásicos, los representaremos esquemáticamente como indica la figura 184, en que A_1B_1 que es el devanado unido al generador, es el circuito primario, y llamaremos n_1 al número de espiras de este devanado y r_1 a su resistencia; A_2B_2, que es el devanado unido a los aparatos de utilización, es el circuito secundario, y designaremos respectivamente con n_2 y r_2 el número de espiras de este devanado y su

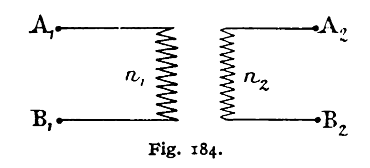


Fig. 184.

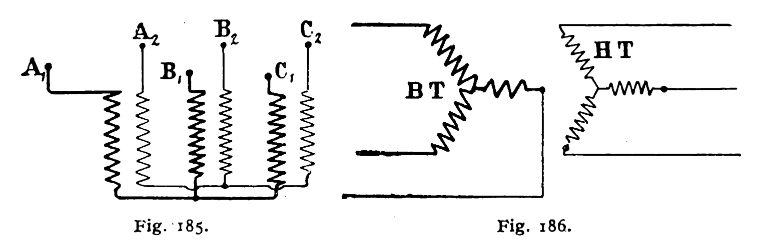


Fig. 185.

Fig. 186.

resistencia. El devanado correspondiente a la baja tensión se representa como A_1B_1, y el que corresponde a la alta tensión, como A_2B_2. El circuito primario es el

devanado de baja tensión si el transformador está destinado a elevar la tensión; al contrario, este devanado es el de alta tensión, si el transformador se emplea para reducir la tensión.

Un transformador trifásico está representado por una de las figuras 185 y 186 (transformador en estrella), o por la 187 (transformador estrella-triángulo). Llamaremos n_1 al número de espiras de cada uno de los circuitos primarios, y n_2 al número de espiras de cada circuito secundario.

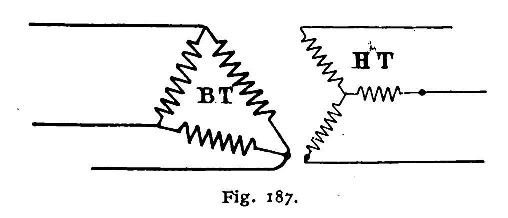


Fig. 187.

I. Relación de transformación. — Se llama así al cociente entre la tensión secundaria U_2 y la tensión primaria U_1.

a) *Relación de transformación en vacío.* — Es la relación entre la tensión en los bornes del secundario, y la tensión en los del primario cuando está abierto el circuito secundario. Para determinarla se alimenta el primario a una tensión alterna U_1, estando el secundario cerrado sobre un voltímetro o sobre un electrómetro que indica la tensión U_2. La relación de transformación en vacío es:

$$m = \frac{U_2}{U_1},$$

que es aproximadamente igual a $\frac{n_1}{n_2}$ (tomo I, pág. 499).

De ordinario, para no tener que medir directa-

mente la tensión elevada U_2 se cierra el secundario del transformador estudiado T sobre el circuito de alta tensión de otro transformador de medida t cuya relación de transformación m' sea perfectamente conocida. Un

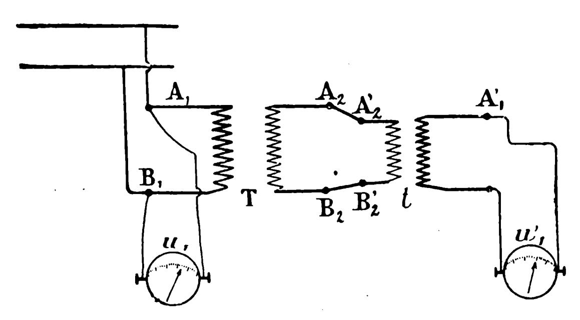


Fig. 188.

voltímetro derivado entre los bornes de la baja tensión de este segundo transformador indica una tensión U'_1 menor que U_2 (fig. 188).

Evidentemente se tiene:

$$m = \frac{U_2}{U_1} \quad \text{y} \quad m' = \frac{U_2}{U'_1},$$

de donde:

$$U_2 = m' U'_1 \quad \text{y} \quad m = m' \frac{U'_1}{U_1}.$$

b) *Relación de transformación en carga.* — Es la relación entre la tensión U_2 en los bornes del secundario, cerrado sobre un circuito exterior, y la tensión U_1 en los bornes del primario. Esta relación es menor que la de transformación en vacío m, a causa de la caída de tensión debida a la resistencia óhmica del secundario y a las fugas magnéticas. Si no hubiera caída de tensión, la tensión en los bornes del secundario sería mU_1; en

realidad tiene un valor U_2 inferior a mU_1, y la caída de tensión es:

$$U' = mU_1 - U_2.$$

Se llama *coeficiente de regulación* a la relación $\frac{mU_1 - U_2}{U_2}$, es decir:

$$\frac{\text{tensión en vacío} - \text{tensión en carga}}{\text{tensión en carga}}.$$

II. Caída de tensión.—La caída de tensión puede determinarse por una medida directa, o por el método indirecto debido a Kapp.

a) *Medida directa.* — Se cierra el secundario sobre un circuito cuya resistencia se pueda variar, formado, por ejemplo, de reostatos sin autoinducción (de lámparas o líquidos) con los cuales se ponen en derivación carretes cuyo coeficiente de autoinducción sea variable. Se coloca un voltímetro entre los bornes del primario, otro voltímetro entre los del secundario y en éste se intercala un wattímetro o dos, según que el transformador sea monofásico o trifásico. Se regulan las resistencias óhmicas y los carretes de autoinducción del circuito exterior, de modo que se cumplan las condiciones de funcionamiento dadas, y se anotan al mismo tiempo las tensiones en los bornes del primario U_1 y en los del secundario U_2. Si m es la relación de transformación en vacío, es decir, si $m = \frac{n_2}{n_1}$, la caída de tensión es $mU_1 - U_2$.

Este método directo necesita la producción y la absorción de la potencia para la cual se quiere hallar la caída de tensión y en las condiciones particulares de corriente y defasaje dadas. La realización de estas condiciones es difícil de obtener si se trata de grandes

potencias, y como por otra parte la caída de tensión es pequeña, las diferencias debidas a los aparatos de medida y a las lecturas ocasionan un error bastante grande, por lo cual este método no presenta garantías de una precisión suficiente. Generalmente, conviene más recurrir al método indirecto.

b) *Determinación indirecta de la caída de tensión: método de Kapp.* — Sea un transformador T cuyo secundario está cerrado sobre un circuito exterior. Cuando se aplica entre los extremos del primario una tensión alterna U_1, éste es recorrido por una corriente de valor eficaz I_1; entre los extremos del secundario se origina una tensión eficaz U_2, y como este circuito está cerrado, es recorrido por una corriente de valor eficaz I_2.

Consideremos el funcionamiento en un instante determinado, cuando la corriente en el primario es i_1 y la corriente en el secundario es i_2; la fuerza magnetomotriz creada por el primario será 1,25 $n_1 i_1$. Por la influencia de estas fuerzas magnetomotrices aplicadas al circuito magnético del transformador, circula un flujo φ por este circuito de reluctancia $\mathcal{R}$, y aplicando la fórmula general ya conocida, que dice que la suma de las fuerzas magnetomotrices es igual a la suma de los productos de la reluctancia de cada parte del circuito por el flujo que la atraviesa, se tiene (tomo I, página 198):

$$1{,}25\, n_1 i_1 + 1{,}25\, n_2 i_2 = \mathcal{R}\varphi.$$

El flujo periódico φ tiene un valor máximo casi constante, es decir, independiente de la intensidad de la corriente en los circuitos del transformador, porque da origen en el circuito primario a una f. e. m. inducida que es igual y directamente opuesta a la tensión prima-

ria U_1 constante, ya que la caída de tensión óhmica es casi despreciable en el primario.

En cuanto a la reluctancia $\mathcal{R}$ del circuito magnético, es muy pequeña, pues la inducción de este circuito es muy débil (el hierro está lejos aún de su saturación), inferior a 10000 gauss, de modo que siendo despreciable este valor de $\mathcal{R}$, se puede escribir:

$$1{,}25\ n_1 i_1 + 1{,}25\ n_2 i_2 = 0,$$

o sea:

$$(1) \qquad n_1 i_1 = -n_2 i_2, \qquad i_1 = -m i_2.$$

Como se ve, i_2 es constantemente de sentido contrario a i_1. La corriente i_1 da origen a un flujo, y una sola parte de éste, φ_1, de valor eficaz Φ_1, atraviesa el circuito secundario, y la otra φ'_1 de valor eficaz Φ'_1, no lo atraviesa. Del mismo modo, la corriente i_2 produce un flujo en que una de sus partes φ_2 de valor eficaz Φ_2, atraviesa el circuito primario, mientras que la otra parte φ'_2, de valor eficaz Φ'_2, no lo atraviesa.

Los flujos φ_1 y φ_2 se componen, dando un flujo resultante φ de valor eficaz Φ común a los dos circuitos primario y secundario; este flujo alterno produce en cada espira que atraviesa una f. e. m., cuyo valor vamos a suponer que es e en el instante considerado.

Admitiremos que el flujo de escape Φ'_1 es proporcional a la corriente primaria, de manera que su valor máximo será:

$$\Phi'_{1\,max} = l_1 I_{1\,max},$$

siendo l_1 un factor constante y que por lo tanto no depende de las condiciones de funcionamiento del transformador, sino solamente de su construcción. Se sabe (tomo I, pág. 398) que este flujo induce en el circuito primario que atraviesa una f. e. m. igual a $2\pi N l_1 I_{1\,ef}$

o a $l_1\omega I_{1ef}$ (siendo $\omega = 2\pi N$), y en el instante considerado el valor de esta f. e. m. es $l_1\omega i_1$, siendo i_1 el valor instantáneo de la corriente.

Ahora bien, ya hemos dicho que $i_1 = -mi_2$, luego la f. e. m. inducida en el primario por el flujo de escape tiene por valor instantáneo $-ml_1\omega i_2$.

En resumen, que este circuito primario de resistencia r_1 es recorrido por la corriente i_1 producida: 1.º por la tensión u_1 aplicada entre sus extremos; 2.º por la f. e. m. debida al flujo resultante Φ, de valor e en cada espira y por consiguiente de valor total igual a n_1e; 3.º por la f. e. m. $-ml_1\omega i_2$, producida por el flujo de escape Φ'_1; por lo tanto se tiene:

$$u_1 + n_1 e - ml_1\omega i_2 = r_1 i_1,$$

y como

$$i_1 = -mi_2,$$

resulta en definitiva:

$$u_1 + n_1 e - ml_1\omega i_2 = -mr_1 i_2. \qquad (1)$$

Consideremos ahora el secundario, de resistencia r_2 y cerrado sobre un circuito exterior. En este circuito se producen dos f. e. m., una de ellas creada por el flujo resultante Φ y la otra por el flujo de escape Φ'_2 que seguimos admitiendo como proporcional a la corriente secundaria I_2, y por consiguiente, de valor máximo igual a:

$$\Phi'_{2max} = l_2 I_{2max},$$

siendo l_2 un factor constante.

En el instante considerado, la primera tiene por valor n_2e y la segunda $l_2\omega i_2$. Bajo la influencia de estas dos f. e. m. pasa una corriente i_2 por el circuito exterior y se produce entre los extremos de este circuito una diferencia de potencial u_2. La suma de las fuerzas

electromotrices está equilibrada por la caída de tensión en el circuito secundario $r_2 i_2$ y por la diferencia de potencial u_2 en los bornes del circuito exterior, teniéndose:

$$(2) \qquad n_2 e + l_2 \omega i_2 = r_2 i_2 + u_2.$$

De la ecuación (1) se deduce:

$$n_1 e = -m r_1 i_2 + m l_1 \omega i_2 - u_1,$$

y de la ecuación (2):

$$n_2 e = r_2 i_2 - l_2 \omega i_2 + u_2.$$

Dividiendo ordenadamente estas dos últimas igualdades, resulta:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{-m r_1 i_2 + m l_1 \omega i_2 - u_1}{r_2 i_2 - l_2 \omega i_2 + u_2},$$

y como $\frac{n_1}{n} = \frac{1}{m}$, se tiene:

$$\frac{1}{m} = \frac{-m r_1 i_2 + m l_1 \omega i_2 - u_1}{r_2 i_2 - l_2 \omega i_2 + u_2},$$

o sea:

$$r_2 i_2 - l_2 \omega i_2 + u_2 = -m^2 r_1 i_2 + m^2 l_1 \omega i_2 - m u_1,$$

o también:

$$(3) \qquad i_2 (r_2 + m^2 r_1) - \omega i_2 (l_2 + m^2 l_1) + u_2 + m u_1 = 0.$$

Si se conoce el valor de $l_2 + m^2 l_1$, con esta igualdad (3) representada gráficamente se puede obtener el valor eficaz de u_2 en función de los valores eficaces de u_1 y de i_2, porque es fácil medir r_1 y r_2, y por consiguiente, obtener el valor de $r_2 + m^2 r_1$.

Para determinar el valor de $l_2 + m^2 l_1$ se cierra el secundario en cortocircuito sobre un amperímetro y se

aplica en los bornes del primario una tensión pequeña y del mismo período que debe tener la tensión primaria U_1; después se aumenta esta tensión hasta que se obtenga la corriente dada I_2 en el secundario; sea U'_1 la tensión que se obtiene de este modo.

El circuito exterior sobre que se ha cerrado el secundario no tiene resistencia ni autoinducción, por lo cual la tensión entre sus extremos es nula. La ecuación (3) es, en este caso:

$$i_2(r_2 + m^2 r_1) - i_2\omega(l_2 + m^2 l_1) + mu'_1 = 0,$$

o sea:

$$(4) \qquad mu'_1 = -i_2(r_2 + m^2 r_1) + i_2\omega(l_2 + m^2 l_1).$$

Vamos a representar gráficamente esta igualdad: el término $-i_2(r_2 + m^2 r_1)$ está representado por un vector OA de longitud $I_2(r_2 + m^2 r_1)$ (figura 189); el término $i_2 w(l_2 + m^2 l_1)$ es una f. e. m. de autoinducción producida por la corriente i_2; esta f. e. m. está defasada 90° sobre i_2 y está representada por el vector OB perpendicular al OA y de longitud igual a $I_2\omega(l_2 + m^2 l_1)$; finalmente el miembro mu'_1, que es la suma de estas dos cantidades alternas, está representado por el vector AB cuya longitud es mU'_1.

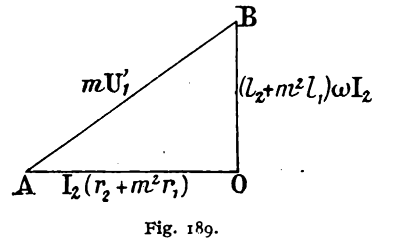


Fig. 189.

De aquí resulta que la cantidad $I_2\omega(l_2 + m^2 l_1)$ se obtiene del modo siguiente:

Se traza OA, que mide, en la escala que se adopte, $I_2(m^2 r_1 + r_2)$ volts; por O se levanta la perpendicular a OA y desde A como centro y con un radio cuya longitud mida, con la misma escala de antes, mU'_1 volts,

se traza una circunferencia que cortará en B a la perpendicular a OA. La longitud OB da, en la misma escala, el valor de $I_2\omega(m^2l_1 + l_2)$.

Una vez obtenido este valor, se puede determinar U_2. En efecto, la igualdad (3) puede ponerse en esta forma:

$$-mu_1 = i_2(r_2 + m^2r_1) - i_2\omega(ml_2 + m^2l_1) + u_2.$$

Representemos geométricamente esta igualdad, y para ello sean (fig. 190): OA el vector que representa $i_2(m^2r_1 + r_2)$, de longitud igual a $I_2(m^2r_1 + r_2)$; OB el vector representativo de $-i_2\omega(l_2 + m^2l_1)$, de longitud

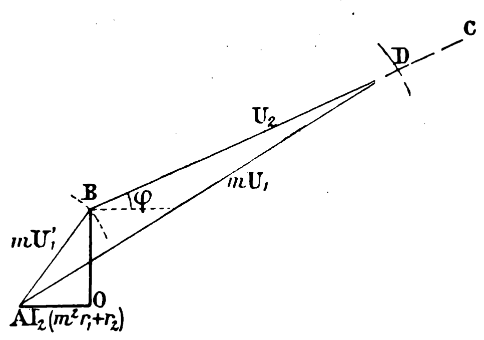


Fig. 190.

$I_2\omega(l_2 + m^2l_1)$; $i_2\omega(l_2 + m^2l_1)$ está defasado 90° en atraso respecto a i_2, luego $-i_2\omega(l_2 + m^2l_1)$ estará defasado 90° en adelanto sobre i_2; BD el vector que representa u_2, defasado φ en adelanto sobre i_2 y de longitud igual a U_2.

La suma geométrica de estos tres vectores OA, OB, BD es el vector AD que representa $-mu_1$ y que tiene por longitud mU_1.

De aquí se deduce que U_2 se obtiene del modo siguiente: se traza OA, que mide en la escala adoptada $I_2(r_2 + m^2r_1)$; se levanta por O la perpendicular a OA, y desde A como centro con mU'_1 como radio se des-

cribe una circunferencia que cortará en B a esta perpendicular; por B se traza una recta BC que forme con la paralela a AO el ángulo φ dado, y desde A como centro con mU_1 por radio se traza un arco de círculo que corta a BC en D; la longitud BD mide, en la escala empleada, la tensión U_2, que es lo que se buscaba.

La caída de tensión es $mU_1 - U_2$, medida por $AD - BD$.

El triángulo $A\ O\ B$ se llama *triángulo fundamental*.

OBSERVACIÓN. — Para hallar el valor de la expresión $I_2(r_2 + m^2r_1)$, se pueden medir las resistencias r_1 y r_2 de los circuitos primario y secundario. Pero se puede proceder de este otro modo: se dispone en el circuito primario un wattímetro y se cierra el secundario en cortocircuito sobre un amperímetro; en estas condiciones la tensión primaria es poco elevada, por lo cual el flujo en el circuito magnético es pequeño, de modo que las pérdidas de potencia por histeresis y corrientes de Foucault son despreciables y el wattímetro indica la potencia gastada por efecto Joule en los dos circuitos primario y secundario. Por consiguiente, si W_1 es la potencia dada por el wattímetro, se tiene:

$$W_1 = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2,$$

y como $I_1 = mI_2$, resulta:

$$W_1 = r_2 I_2^2 + m^2 r_1 I_2^2 = I_2^2 (r_2 + m^2 r_1),$$

de donde:

$$\frac{W_1}{I_2} = I_2(r_2 + m^2 r_1).$$

EJEMPLO. — Estudio de un transformador alimentado a 50 volts.

Relación de transformación en vacío: m. — Tensión medida en los bornes del primario: $U_1 = 50$ volts.

Tensión medida en los bornes del secundario: $U_2 = 100$ volts.

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{100}{50} = 2.$$

Resistencias de los circuitos primario y secundario r_1 *y* r_2. — Estas resistencias medidas en caliente (al cabo de cierto tiempo de funcionamiento) por el método de comparación, han resultado ser:

$$r_1 = 0{,}019 \qquad r_2 = 0{,}072;$$

luego:

$$r_2 + m^2 r_1 = 0{,}072 + 4 \times 0{,}019 = 0{,}148.$$

Prueba en cortocircuito. — Estando cerrado el secundario en cortocircuito se ha aplicado a los bornes del primario una tensión pequeña poco a poco creciente, y se ha anotado para varios valores de esta tensión la intensidad de la corriente secundaria, resultando los valores siguientes:

Tensión primaria: U'_1	Corriente en el secundario: I'_2
2,11 volts	19 amperes
4,55 »	41 »
6,00 »	54 »
6,60 »	60 »
7,55 »	68 »

La curva que representa las variaciones de la corriente I'_2 en función de la tensión U'_1 resulta ser una línea recta (fig. 191).

Determinación de las tensiones secundarias y de las caídas de tensión: 1.º, *para una corriente secundaria de 60 amperes siendo* $\cos \varphi = 1$, 2.º, *para una corriente*

secundaria de 60 amperes y cos φ = 0,8. — Triángulo fundamental (fig. 192):

$$I_2(r_2 + m^2 r_1) = 60 \times 0{,}148 = 8{,}88 \text{ volts.}$$

Esta cantidad, en la escala de 2 mm. por volt, está medida por OA = 17,76 mm.

La prueba en cortocircuito da para una corriente de 60 amperes en el secundario en cortocircuito una

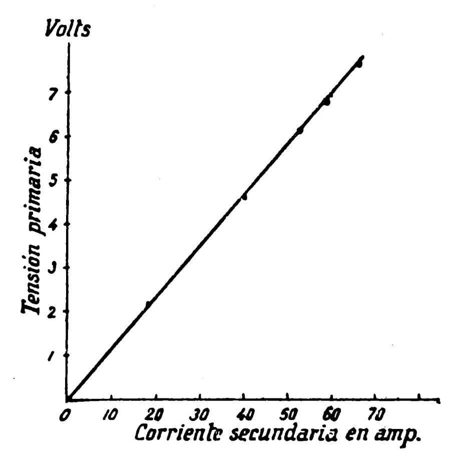


Fig. 191.

tensión primaria U'_1 = 6,6 volts, luego mU'_1 es igual a 13,2 volts y está representado por AB, que mide, en la escala adoptada, 26,4 mm.

1.º Se traza por B una paralela BC a OA (cos $\varphi = 1$, $\varphi = 0$) y desde A como centro se describe una circunferencia con un radio mU_1, siendo U_1 la tensión primaria normal, igual a 50 volts, es decir, que mU_1 será igual a 100 volts, correspondiéndole en la escala empleada una longitud de 200 milímetros. Este arco de circunferencia corta a BC en D y la longitud BD da la tensión U_2 en los bornes del secundario.

Esta longitud medida sobre el gráfico es de 181 milímetros, correspondiendo por consiguiente a una tensión $U_2 = 90{,}5$ volts.

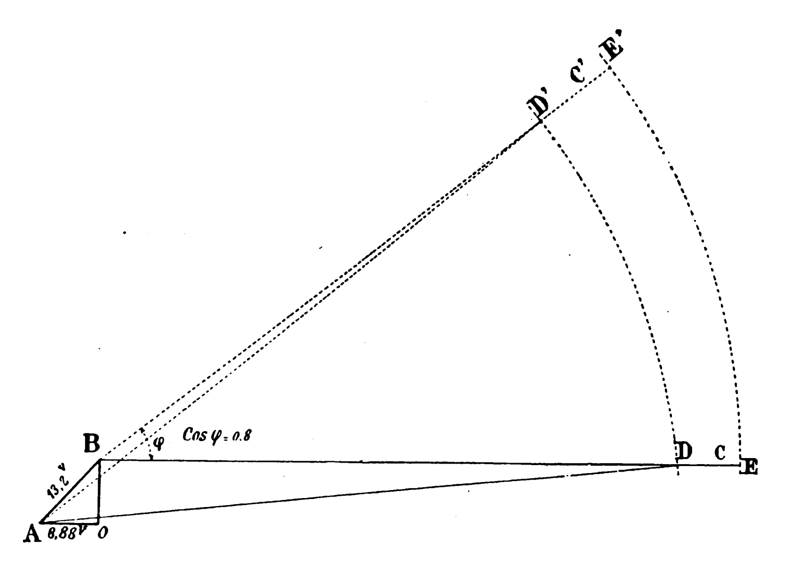


Fig. 192.

Por lo tanto, la caída de tensión es:

$$mU_1 - U_2 = 100 - 90{,}5 = 9{,}5 \text{ volts.}$$

2.º Para tener la caída de tensión cuando cos φ es igual a 0,8, se traza BC' que forme con BC el ángulo φ; la circunferencia descrita desde A como centro con un radio de 200 mm. corta a BC' en D', y la longitud de BD' mide, en la escala adoptada, la tensión U_2 en los bornes del secundario. Ahora bien, este segmento BD' tiene 173 mm. de longitud, luego la tensión es $U_2 = 86{,}5$ volts.

Por consiguiente, la caída de tensión será:

$$100 - 86{,}5 = 13{,}5 \text{ volts.}$$

Observación I. — Si desde B como centro, cou un radio igual a AD, es decir, con 200 mm. de radio, se describe una circunferencia, cortará a BC y BC' en E y E', y las caídas de tensión estarán medidas por las longitudes DE y $D'E'$.

Observación II. — El ejemplo anterior pone de relieve el inconveniente de la construcción de Kapp; las dimensiones del triángulo fundamental OAB son excesivamente pequeñas con relación a las que representan mU_1 y U_2, sin tener en cuenta que para facilitar la construcción hemos tomado como ejemplo un transformador demasiado malo, ya que la caída de tensión resulta ser de bastante consideración. Cuando se trata de un transformador bien construído, las dimensiones del triángulo fundamental respecto a las de los vectores que representan a las tensiones mU_1 y U_2 son mucho más pequeñas. En cambio, si se toma una escala bastante grande para que el triángulo fundamental pueda dibujarse con alguna precisión, los vectores OD y OC resultan de una longitud excesivamente grande. A esto se debe que en la figura 192 hayamos tomado una escala de 0,8 mm. por volt, en vez de los 2 mm. por volt que debiéramos haber empleado, siendo conveniente que al hacer este estudio se hagan los diagramas con una escala mayor, confrontando después los resultados.

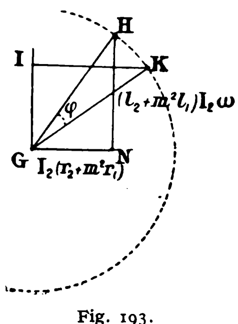


Fig. 193.

Se puede salvar este inconveniente adoptando el método siguiente.

Se construye con una escala cualquiera conveniente el triángulo GNH (fig. 193) igual al fundamental OAB. Desde el punto G como centro se describe una

circunferencia con GH por radio; se traza una recta que forme con GH el ángulo dado φ, que cortará a la circunferencia en K; por K se traza la paralela a GN que cortará en I a la perpendicular a esta recta: se demuestra geométricamente que la longitud KI mide, en la escala adoptada, la caída de tensión.

Apliquemos esta construcción al transformador anterior, y determinemos las caídas de tensión para corrientes secundarias I_2, de 20, 30, 40, 50 amperes, siendo $\cos\ \varphi = 0{,}8$.

Para estos diferentes valores de I_2, la expresión $(r_2 + m^2 r_1) I_2$ tiene por valores: $1{,}48 \times 2$; $1{,}48 \times 3$; $1{,}48 \times 4$; $1{,}48 \times 5$ y $1{,}48 \times 6$; tomemos por escala 5 mm. por volt, y sea OA_5 que mide $1{,}48 \times 5 = = 7{,}40$ volts, de longitud igual a 37 mm., y dividá-

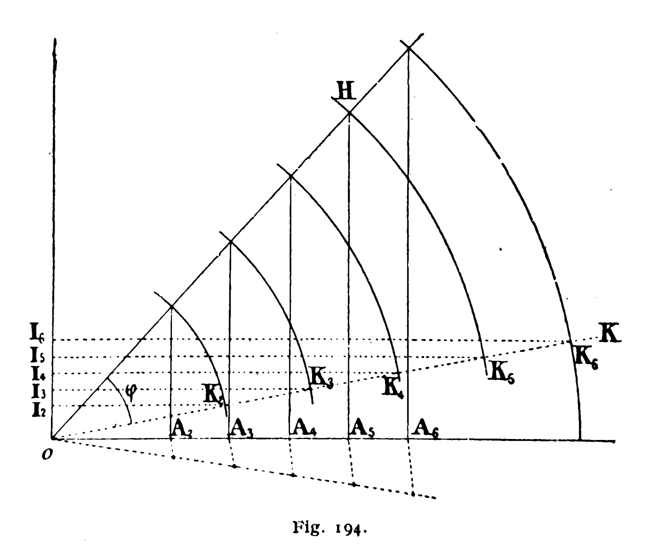


Fig. 194.

moslo en cinco partes iguales (fig. 194), con lo cual se obtendrán longitudes OA_2, OA_3, OA_4, OA_5, OA_6, que medirán los valores de $(r_2 + m^2 r_1) I_2$. La curva que

representa los resultados de la prueba en cortocircuito (figura 191), da para las tensiones primarias necesarias para obtener en el secundario en cortocircuito las distintas corrientes:

U'_1 =	2,2	volts	para	20	amperes
	3,3	»		30	»
	4,4	»		40	»
	5,5	»		50	»
	6,6	»		60	»

Por consiguiente, desde el punto O como centro, trazaremos cinco circunferencias que tengan por radios la longitud mU'_1 medida en la escala adoptada; los radios de estas circunferencias tienen respectivamente por longitud (fig. 194):

$$2 \times 2{,}2 \times 5 = 22 \text{ milímetros}$$
$$2 \times 3{,}3 \times 5 = 33 \quad »$$
$$2 \times 4{,}4 \times 5 = 44 \quad »$$
$$2 \times 5{,}5 \times 5 = 55 \quad »$$
$$2 \times 6{,}6 \times 5 = 66 \quad »$$

Por el punto A_5, por ejemplo, se traza una perpendicular a OA_5 que corta a la circunferencia correspondiente de radio de 55 mm. en el punto H y se une el punto O con el H; la recta OH cortará a las circunferencias trazadas en puntos que tienen respectivamente por abscisas OA_2, OA_3, OA_4, OA_5 y OA_6. Por O se traza una recta OK que forme con OH un ángulo φ tal que $\cos \varphi = 0{,}8$; esta recta cortará a las circunferencias en puntos K_2, K_3, K_4, K_5 y K_6, y las longitudes K_2I_2, K_3I_3, K_4I_4, K_5I_5 y K_6I_6 miden en la escala adoptada las caídas de tensión correspondientes a las corrientes 20, 30, 40, 50 y 60 amperes. Estas longitudes son 22; 32; 43; 53,5 y 65 milímetros, y las caídas de tensión 4,4;

6,4; 8,6; 10,7 y 13 volts. Por consiguiente, las tensiones en los bornes del secundario son:

para $I_2 = 20$ amperes,	$u_2 = 95,6$ volts,	$\cos\varphi = 0,8$
30 »	93,6 »	»
40 »	91,4 »	»
50 »	89,3 »	»
60 »	87,0 »	»

III. Rendimiento.—El rendimiento de un transformador es la relación entre la potencia W_2 recogida en los bornes del secundario y la potencia W_1 comunicada al primario, es decir:

$$\rho = \frac{W_2}{W_1}.$$

Método directo. — Para determinar el rendimiento por el método directo, se coloca un wattímetro en el primario, y en el secundario se dispone un wattímetro, un voltímetro y un amperímetro. Se hace variar la resistencia y la reactancia del circuito sobre el cual está cerrado el secundario de modo que se tengan las condiciones dadas de potencia, tensión y defasaje. La relación entre las potencias dadas por los dos wattímetros mide el rendimiento buscado.

Este método no se emplea mucho porque el rendimiento de un transformador es muy elevado, por lo cual la diferencia entre las potencias gastadas en el primario y en el secundario es muy pequeña y puede quedar considerablemente alterada por los errores que siempre se cometen al hacer las lecturas: un error de 1 % en las medidas hechas por los dos wattímetros daría un error del 2 % en el número que expresa el rendimiento.

Sin embargo, si se trata de probar dos transformadores iguales, caso frecuente en las casas constructoras, se puede proceder del modo siguiente.

Se cierran uno sobre otro los secundarios de los dos transformadores T_1 y T_2 (fig. 195); el primario de T_1 está alimentado por un generador de tensión U_1 y de frecuencia N, iguales a la tensión y la frecuencia del generador que debe alimentar los transformadores. Sobre los circuitos primarios de T_1 y T_2 hay: dos

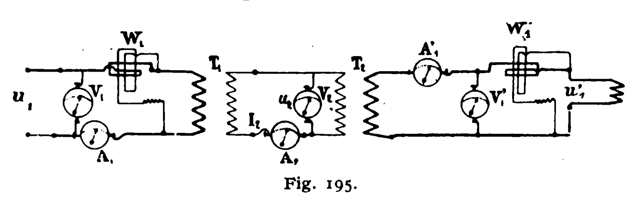


Fig. 195.

wattímetros W_1 y W'_1; dos voltímetros V_1 y V'_1, y dos amperímetros A_1 y A'_1. Sobre los conductores que unen los dos secundarios hay un amperímetro A_2 y entre los bornes comunes un voltímetro V_2.

El primario de T_2 está cerrado sobre un circuito exterior cuya resistencia y reactancia se pueden variar a voluntad, y se hace la regulación de modo que la corriente I_2 y el factor de potencia $\cos \varphi = \frac{W'_1}{U'_1 I'_1}$ sean los dados. Una vez realizadas estas condiciones, se leen las indicaciones de los dos wattímetros W_1 y W'_1, y el rendimiento de cada uno de estos transformadores es:

$$\rho = \sqrt{\frac{W'_1}{W_1}}.$$

En efecto, sea W_2 la potencia absorbida por el circuito en que están los dos transformadores. El rendimiento de T_1 es: $\rho = \frac{W_2}{W_1}$, y el de T_2 es: $\rho = \frac{W'_1}{W_2}$ y multiplicando estos dos rendimientos se tiene:

$$\rho^2 = \frac{W_2}{W_1} \times \frac{W'_1}{W_2} = \frac{W'_1}{W_1}, \quad \text{de donde} \quad \rho = \sqrt{\frac{W'_1}{W_1}}.$$

Es preferible emplear el siguiente método, que tiene la ventaja de requerir solamente una pequeña potencia.

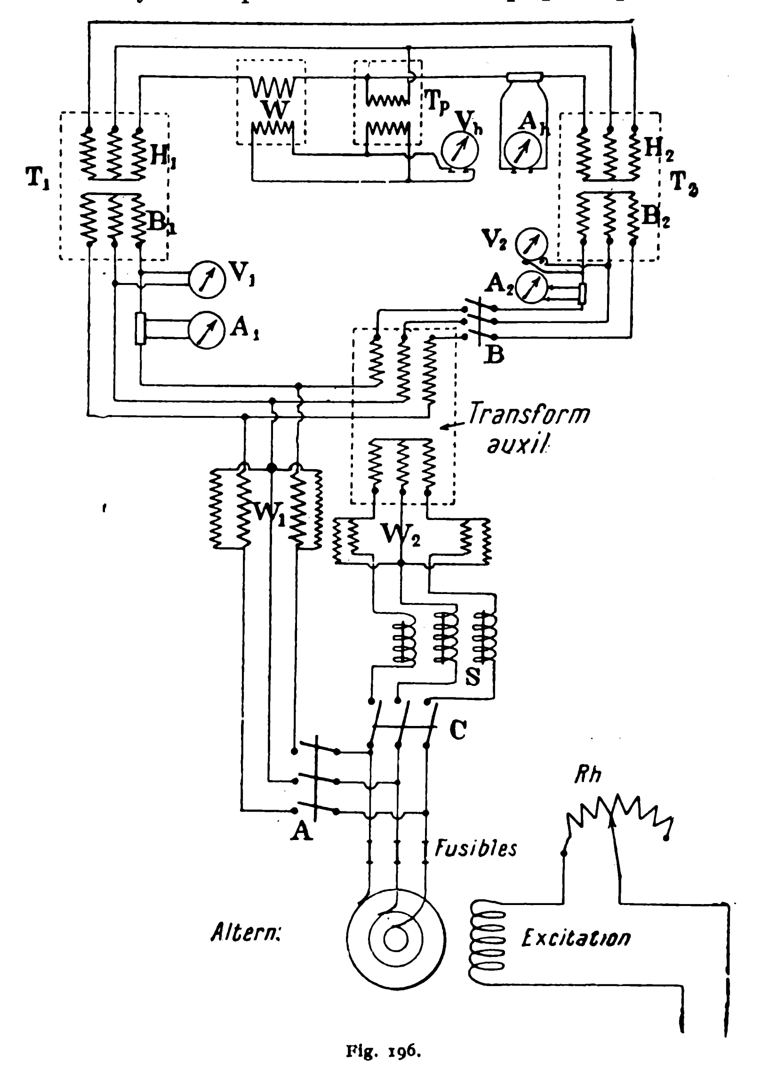


Fig. 196.

Prueba con recuperación. — Este método resulta

muy cómodo en el caso particular de hacer la prueba en carga de transformadores idénticos. Para ello se hace el montaje indicado por la figura 196.

Los secundarios (alta tensión) están conectados en oposición y los primarios van alimentados en paralelo por un generador que da la tensión y la frecuencia para que están calculados los transformadores.

Sobre los conductores que unen a los primarios hay un transformador cuyo secundario está alimentado por el generador bajo una tensión que se puede variar mediante resistencias o carretes de autoinducción S. Este transformador auxiliar desempeña el papel de elevador de tensión para uno de los transformadores en ensayo, de modo que crea una diferencia de tensión que permite obtener las condiciones de marcha normal, o sea una corriente I en los primarios bajo una tensión U.

Para hacer esta prueba se procede del modo siguiente:

1.º Comprobación del montaje en oposición de los secundarios H_1 y H_2. Sobre los conductores que vienen del generador hay colocados fusibles finos; estando abiertos los interruptores A, B, C, se cierra A y después B; si las conexiones están bien hechas, no circula corriente alguna por H_1 ni H_2, y en los primarios B_1, B_2 hay la corriente poco intensa tomada en vacío, por lo cual no se funden los plomos. Una vez establecido el orden de las conexiones de modo que se cumpla esta condición, se sustituyen los plomos por otros que puedan soportar la corriente usual en los primarios.

2.º Se regula el reostato de excitación Rh del generador de modo que se obtenga la tensión deseada, y estando los carretes de autoinducción S en su máximo

de reactancia, se cierra el interruptor C y se regulan los carretes hasta obtener en B_1 y B_2, corrientes I_1, I_2, de valor aproximado a I, una por exceso y otra por defecto, tales que $I = \frac{I_1 + I_2}{2}$.

Si W_1 es la potencia indicada por el wattímetro derivado entre los conductores que alimentan B_1, B_2, y W_2 la potencia dada por el wattímetro derivado sobre los conductores conectados con el transformador auxi-

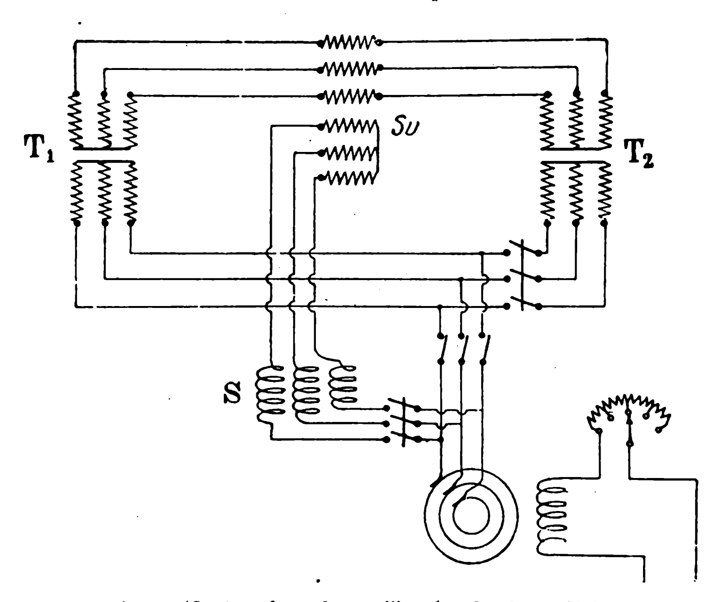


Fig. 197 (*Su*, transformador auxiliar elevador de tensión).

liar, $W_1 + W_2$ medirá la suma de las pérdidas en los dos transformadores, de modo que, siendo aproximadamente las mismas las condiciones de funcionamiento de ambos, las pérdidas en cada uno de ellos son: $\frac{W_1 + W_2}{2}$.

Si W es la potencia en el secundario, el rendimiento es:

$$\rho = \frac{W}{W + \frac{W_1 + W_2}{2}} .$$

OBSERVACIÓN. — También se puede disponer el transformador auxiliar *Su* sobre los conductores que unen a los secundarios de los transformadores. En este caso el montaje es el indicado en la figura 197.

Método indirecto de las pérdidas separadas. — Se da la tensión primaria U_1 y se quiere determinar el rendimiento del transformador cuando produce una corriente dada I_2 con un defasaje también dado φ.

Ya hemos visto anteriormente que, mediante el diagrama de Kapp, se puede determinar la tensión secundaria U_2, por lo cual se conoce la potencia recogida en los bornes del secundario, que será:

$$W_2 = U_2 I_2 \cos \varphi.$$

Si la potencia perdida en la transformación es W, la potencia comunicada al primario es:

$$W_1 = U_2 I_2 \cos \varphi + W,$$

y el rendimiento será:

$$\rho = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi}{U_2 I_2 \cos \varphi + W} .$$

Evaluación de las pérdidas. — Estas pérdidas son: 1.º Pérdidas por efecto Joule en el primario y en el secundario; 2.º, pérdidas por histeresis y corrientes de Foucault.

1.º *Pérdidas por efecto Joule.* — Tienen por valor:

$$r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2.$$

Se conoce la corriente I_2 dada y la relación de transformación m, luego:

$$I_1 = mI_2$$

y por consiguiente

$$r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 = m^2 r_1 I_2^2 + r_2 I_2^2 = I_2^2 (r_2 + m^2 r_1).$$

Como las resistencias r_1 y r_2 se conocen por medición directa, pueden deducirse fácilmente las pérdidas por efecto Joule.

También se puede (como hemos visto en la página 246) cerrar el secundario en cortocircuito sobre un amperímetro poco resistente, y colocar un wattímetro sobre el primario que se alimenta bajo una tensión tal que el secundario sea recorrido por la corriente I_2; la potencia indicada por este wattímetro da el valor de $I_2^2\ (r_2 + m^2 r_1)$. En efecto, por estar el secundario en cortocircuito, la tensión entre sus bornes es casi nula, la tensión primaria es también muy pequeña, y el flujo, cuyas variaciones producen esta tensión, tiene un valor máximo muy pequeño, de modo que se pueden despreciar las pérdidas por histeresis y corrientes de Foucault; por lo tanto, la potencia comunicada al primario se transforma completamente en calor por efecto Joule en los circuitos primario y secundario.

2.º *Pérdidas por histeresis y por corrientes de Foucault.* — El valor de estas pérdidas depende de la frecuencia de la tensión primaria y de la inducción máxima a que está sometido el circuito magnético. Ahora bien, esta inducción (pág. 243) tiene un valor casi constante y por lo tanto es la misma en vacío que en carga. Según esto, se alimenta el primario con un generador alterno de igual frecuencia que el generador a que está destinado el transformador, y estando abierto el secundario se disponen sobre el primario un wattímetro y un amperímetro. Sean T_0 la corriente en

el primario y W_0 la potencia indicada por el wattímetro; esta potencia W_0 mide las pérdidas por histeresis y corrientes de Foucault W_{HF} y por efecto Joule $r_1 I_0^2$ en el primario, es decir:

$$W_0 = W_{HF} + r_1 I_0^2;$$

de donde:

$$W_{HF} = W_0 - r_1 I_0^2.$$

En estas condiciones el rendimiento es:

$$\rho = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi}{U_2 I_2 \cos \varphi + (r_2 + m^2 r_1) I_2^2 + W_0 - r_1 I_0^2}.$$

Generalmente I_0 tiene un valor tan pequeño que resulta despreciable el término $r_1 I_0^2$, por lo cual queda:

$$\rho = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi}{U_2 I_2 \cos \varphi + (r_2 + m^2 r_1) I_2^2 + W_0}.$$

OBSERVACIÓN. — El gasto de potencia W_0 en vacío es muy pequeño en general, por lo cual la potencia

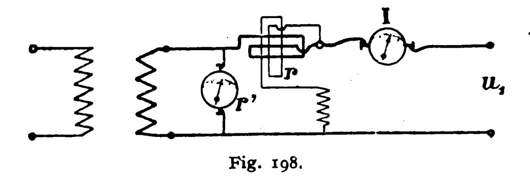


Fig. 198.

consumida por los aparatos de medida no es despreciable, siendo dignas de tenerse en cuenta.

Supongamos que se haya hecho el montaje como indica la figura 198. Sea r la resistencia del hilo fino del wattímetro, I_0 la corriente primaria, y W'_0 la potencia marcada por el wattímetro. La potencia absorbida por histeresis y corrientes de Foucault es:

$$W_0 = W'_0 - \frac{U_1^2}{r} - \frac{U_1^2}{r'} - r_1 I_0^2.$$

IV. Prueba de aislamiento. — Se mide el aislamiento entre cada uno de los dos circuitos primario y secundario y la masa, y el aislamiento de los dos circuitos entre sí.

Prueba de la resistencia a la rotura del aislamiento. — Se procede del mismo modo que para las máquinas de corriente continua (pág. 97).

Prueba de calentamiento. — Para hacer este ensayo habría que cargar el transformador cerrando el secundario sobre un circuito que absorbiera la potencia normal que debe dar el transformador, y alimentar el primario bajo la tensión normal. Funcionando el transformador de este modo, se anotaría a intervalos regulares de tiempo la temperatura de los circuitos, hasta que esta temperatura alcanzara un valor máximo constante. Pero el hacer la prueba de esta manera requeriría para transformadores de cierta potencia un gasto de energía importante, porque la temperatura de régimen no se alcanza hasta después de bastante tiempo de funcionamiento.

Esta temperatura de régimen se puede obtener de un modo más económico y sencillo de la manera siguiente.

Se alimenta el primario con una tensión igual a vez y media la tensión normal, estando el secundario abierto, con lo cual se calentará el hierro por los efectos de histeresis y de las corrientes de Foucault; después, al cabo de media hora, por ejemplo, se cierra el secundario en cortocircuito y se alimenta el primario con una tensión tal, que la corriente en el secundario sea igual al doble de la corriente normal, con lo cual se produce la elevación de temperatura de los circuitos eléctricos por efecto Joule. Se repiten varias veces estas operaciones hasta que se alcance la temperatura máxima fijada. Hecho esto, se hace funcionar el trans-

formador con su carga normal; si la temperatura obtenida anteriormente baja o se mantiene fija al cabo de una hora de funcionamiento es señal de que la temperatura de régimen no excede del valor fijado.

También se puede proceder por un método de oposición, del modo que sigue: el secundario *S* del transformador *T* que se prueba se cierra sobre el secundario *S'* de otro transformador *T'* idéntico al primero (figura 199). El primario *P* de *T* está alimentado por un generador *e* cuya tensión y frecuencia son las mismas que las del generador que ha de alimentar al transformador en cuestión. El primario *P'* de *T'* está en derivación entre los bornes del primario *P* de *T* de tal modo, que sus tensiones estén en oposición, por medio del primario *p* de un pequeño transformador auxiliar *t*, estando *p* en serie con *P'*: El secundario *s* de este transformador está a su vez en derivación con el generador por medio de un reostato *R* y de un interruptor *A*.

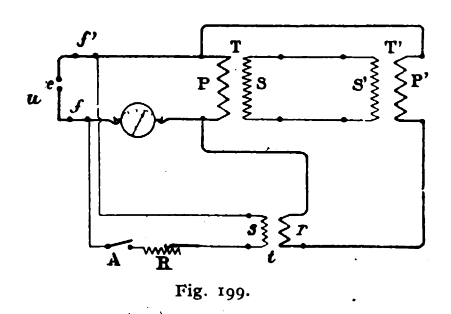


Fig. 199.

Sobre los conductores que unen al generador con el primario *P* hay dos fusibles *f*, *f'* y un amperímetro.

Estando abierto el interruptor *A*, las tensiones en los bornes de los primarios *P* y *P'* son iguales y las tensiones en los bornes de los secundarios *S* y *S'* también lo son. Por lo tanto, si estas dos tensiones están en oposición, no pasará corriente alguna por los circuitos *S* y *S'* y los transformadores funcionan como si estuvieran abiertos sus secundarios. Si las tensiones en los bornes *S* y *S'* no están en oposición, estos dos

circuitos están en serie y cerrados en cortocircuito sobre sí mismos, y los fusibles *f* y *f'* se funden; en este caso se invierte el sentido de las conexiones de *S* y *S'* y se sustituyen los fusibles por otros de sección suficiente para que puedan soportar una corriente igual a la que hay en el primario del transformador *T* en plena carga.

Una vez hecho esto, se cierra el interruptor *A*; el secundario *s* está sometido a la tensión del generador, de modo que se origina una cierta tensión en los bornes del primario *p*, tensión que se suma a la tensión en los bornes de *P'* de tal modo que por los circuitos secundarios *S* y *S'* circula una corriente a causa de la diferencia de tensiones. Se regula mediante el reostato *R* la tensión en los bornes de *s*, de modo que se produzca una corriente tal en los secundarios que la corriente primaria de *T* sea igual a la corriente correspondiente en plena carga. De este modo se tiene un funcionamiento en recuperación, análogo a los que hemos ya utilizado para las máquinas de corriente continua, y sin una gran pérdida de energía se podrá alimentar un transformador en las mismas condiciones que en plena carga durante un tiempo bastante largo para obtener una temperatura constante.

V. Transformador trifásico. — Todas las pruebas anteriores y que hemos supuesto hechas con un alternador monofásico se aplican igualmente a los transformadores trifásicos.

La caída de tensión determinada por el método de Kapp se obtiene operando sobre una de las fases como para un transformador monofásico. Para la medida del rendimiento, las pérdidas por efecto Joule se obtienen por una prueba en cortocircuito cerrando los tres circuitos secundarios sobre tres amperímetros poco resis-

tentes, y las pérdidas por histeresis y por corrientes de Foucault se determinan por una prueba en vacío midiendo la potencia absorbida por medio de dos wattímetros. No basta multiplicar por 3 la potencia absorbida por un solo circuito, porque las partes del circuito magnético no son absolutamente iguales y las potencias tomadas por cada fase no son idénticas.

EJERCICIOS

Estudio de un transformador

1.º Medir la resistencia del circuito primario y la resistencia del circuito secundario en frío, y después en caliente, al cabo de cierto tiempo de funcionamiento.

2.º Medir el aislamiento de los circuitos entre sí y con la masa.

3.º Medir la relación de transformación en vacío.

4.º Medir directamente la caída de tensión para una corriente dada I y $\cos\varphi = 1$. Se carga el secundario sobre un reostato de lámparas.

5.º Determinar indirectamente la caída de tensión por el método de Kapp. Se determina para $\cos\varphi = 1$, $\cos\varphi = 0{,}8$ y $\cos\varphi = 0{,}5$ la característica en carga, es decir, la curva cuyas abscisas son las intensidades de la corriente secundaria y las ordenadas las tensiones correspondientes en los bornes del secundario. Comparar, para $\cos\varphi = 1$ y la corriente antes empleada, el resultado encontrado por este método con el obtenido por la prueba directa anterior.

6.º Estudiar por el método de Kapp las variaciones de la tensión en los bornes del secundario para una corriente constante en el secundario y un factor de potencia variable del circuito de utilización.

7.º Trazar la característica en cortocircuito, es decir, la curva cuyas abscisas son las tensiones aplicadas en los bornes del primario y cuyas ordenadas son las corrientes correspondientes en el secundario cerrado en cortocircuito.

8.º Trazar la curva de las pérdidas por efecto Joule, cuyas abscisas son los valores de la corriente producida, es decir, los valores de la corriente en el secundario en corto-circuito y cuyas ordenadas son los valores dados por el wattímetro intercalado en el primario.

9.º Trazar la curva de las pérdidas en vacío que tiene por abscisas los valores de la tensión aplicada en los bornes del primario, y por ordenadas los valores correspondientes de la potencia absorbida por el primario e indicada por el wattímetro intercalado en este circuito.

10. Determinar el rendimiento para una carga dada por el método directo, y después por el método de las pérdidas separadas, comparando los resultados.

11. Prueba de calentamiento.

CAPÍTULO XII

Motores sincrónicos. — Conmutatrices

Motores sincrónicos

Prueba de funcionamiento. — Cuando un motor sincrónico está alimentado a tensión constante, se puede mantener invariable la potencia desarrollada en su polea haciendo variar la corriente de excitación, pero entonces la corriente tomada por el motor cambia al mismo tiempo que la excitación y tiene un valor mínimo para un valor determinado de la corriente de excitación.

Además, el factor de potencia cos φ varía al mismo tiempo que la excitación; es pequeño para una excitación pequeña y la corriente está defasada en atraso respecto a la tensión en un ángulo φ bastante grande. A medida que se aumenta la excitación, aumenta el factor de potencia, y para un cierto valor de la excitación, es igual a la unidad, en cuyo caso la corriente está en fase con la excitación. Si se sigue aumentando la excitación, cos φ disminuye, pero el defasaje pasa a ser un adelanto.

Por consiguiente, hay un valor de la excitación para cada potencia desarrollada por el motor, para el cual la corriente está en fase con la tensión, siendo este valor el que corresponde a la intensidad mínima de esta

corriente; por esta razón conviene, en general, partir del valor de la excitación.

Esta propiedad de los motores sincrónicos puede explicarse del modo siguiente: sea W la potencia comunicada al motor, que es aproximadamente igual a la potencia desarrollada sobre su polea, y que tiene por valor:

$$W = UI \cos \varphi;$$

siendo U la tensión eficaz aplicada, I el valor eficaz de la corriente en el motor, y φ el defasaje de U sobre I. La corriente I está dada en cada instante por la diferencia entre los valores instantáneos de la tensión aplicada u y de la f. e. m. contraelectromotriz desarrollada e:

$$i = \frac{u - e}{R};$$

donde R es la resistencia del circuito en que está el motor. Si se aumenta la excitación, como la velocidad permanece invariable (tomo I, pág. 341), la fuerza contraelectromotriz aumenta e I disminuye; por otra parte como W y U son constantes, la disminución de I debe estar compensada por un aumento de cos φ. Con este razonamiento llegaríamos a la conclusión de que I disminuye y cos φ aumenta constantemente a medida que crece la excitación, siendo así que la experiencia nos dice lo contrario, o sea que I pasa por un mínimo y cos φ por un máximo igual a la unidad, para un cierto valor de la excitación, a partir del cual I aumenta y cos φ disminuye. Esto es debido a la reacción del inducido; si se aplicara a un motor el razonamiento que hemos hecho para un alternador (pág. 198), se vería que cuando la corriente está defasada *en atraso* respecto a la tensión, el flujo creado por el inducido

refuerza al flujo inductor, y que al contrario, si la corriente está defasada *en adelanto* sobre la tensión, la reacción del inducido *reduce* al flujo inductor. Por consiguiente, puesto que a partir de un cierto valor de la excitación la corriente *I* disminuye, es señal de que la fuerza contraelectromotriz desarrollada disminuye, y por lo tanto, de que disminuye también el flujo a través del inducido; pero el flujo inductor aumenta al mismo tiempo que la excitación, luego el flujo creado por el inducido es la causa de la disminución de la fuerza contraelectromotriz, y la corriente resulta defasada *en adelanto* sobre la tensión.

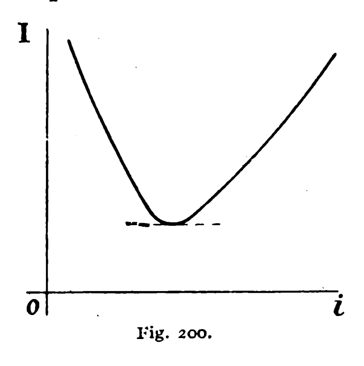


Fig. 200.

Por lo tanto, si para una potencia que se mantiene constante, se determina para diferentes valores crecientes de la corriente de excitación *i* los valores de la intensidad de la corriente *I* en el motor, y si se construye una curva que tenga por abscisas los valores de *i* y por ordenadas los correspondientes de *I*, resultará una curva análoga a la de la figura 200, que por su forma ha sido llamada por Mordey *curva en* V. La curva que representa las variaciones del factor de potencia cos φ en función de la corriente de excitación, tiene la forma que se ve en la figura 201.

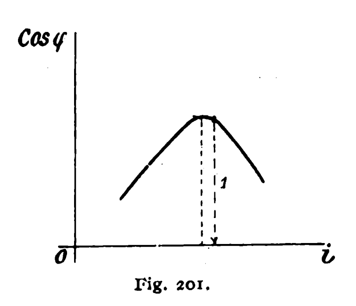


Fig. 201.

De aquí se deduce que para cada valor de la poten-

cia que debe desarrollar el motor, hay que determinar el valor de la corriente de excitación correspondiente al mejor funcionamiento, y por lo tanto, es preciso trazar la curva en V del motor para estas potencias.

Trazado de la curva en V. — La carga del motor se obtiene mediante el freno de Prony o por medio de una dinamo-freno (pág. 113), o haciendo que el motor mueva un generador de corriente continua cuya corriente se hace pasar por un circuito exterior de modo que la potencia comunicada a este circuito se mantenga constante, y si se conoce el rendimiento de este generador, se puede deducir la potencia desarrollada en la polea del motor. En el circuito que alimenta al motor se

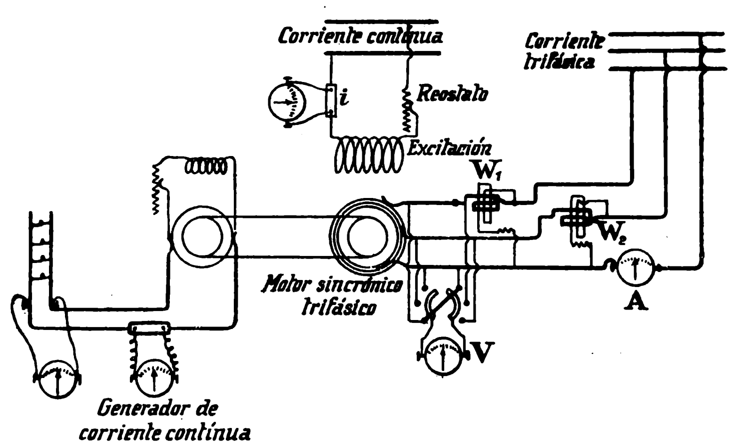


Fig. 202.

disponen un amperímetro y un wattímetro si se trata de un motor monofásico, o dos wattímetros si el motor es trifásico; sobre el circuito que alimenta la excitación se coloca un reostato y un amperímetro (fig. 202).

En primer lugar se hace que arranque y sincronice el motor por uno de los medios conocidos (tomo I, página 514), y después se carga poco a poco hasta obte-

ner la potencia deseada. Entonces se hace variar progresivamente la corriente de excitación i y se anotan, para cada uno de sus valores, las indicaciones del amperímetro y de los wattímetros.

En el caso de un motor trifásico, el factor de potencia cos φ se deduce, como ya hemos dicho en la página 230 y por consiguiente mediante las tablas de las páginas 231 y 232, de las lecturas α_1 y α_2 de los dos wattímetros.

Los resultados se consignan en una tabla como la siguiente, en el caso de un motor trifásico cargado por una generatriz de corriente continua.

GENERATRIZ			ALTERNOMOTOR					
Corriente I'	Tensión u'	Potencia $W' = UI'$	Excitación i	Corriente I	Primer wattímetro W_1	Segundo wattímetro W_2	Potencia suministrada al motor $W = W_1 + W_2$	Factor de potencia cos φ

Trazando las curvas en V para varios valores de la potencia del motor, se obtienen para potencias crecientes P_1, P_2, P_3..., curvas cuyas formas son las que se ven en la figura 203. Las corrientes mínimas corresponden a corrientes de excitación poco diferentes.

Por consiguiente, se podrá determinar para todas las cargas la corriente aproximada de excitación que hay que emplear; en la práctica, para motores de poca potencia, se mantiene constante esta excitación para

todas las cargas; para motores de gran potencia se regula la corriente de excitación para que tengan los valores más convenientes dados por las curvas en V.

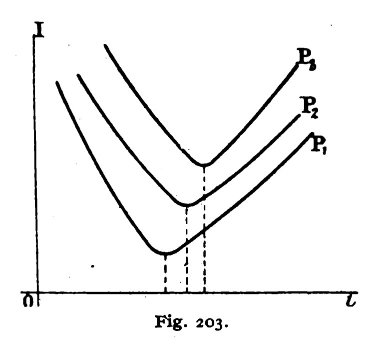


Fig. 203.

Rendimiento.—Con la prueba anterior se puede determinar el rendimiento del motor, pues se obtiene por una parte la potencia W suministrada al motor, y por otra la potencia recogida en su polea $W \times \rho$ (siendo ρ el rendimiento del generador).

Este rendimiento, para una misma potencia, es evidentemente tanto mayor cuanto más se aproxima la corriente de excitación al valor que corresponde a la menor corriente en el motor, es decir, cuanto más se acerca cos ρ a valer la unidad.

El rendimiento se puede obtener por el método de las pérdidas separadas, del mismo modo que para un alternador.

Conmutatrices

Las conmutatrices son máquinas de corriente continua que, además del colector, tienen sobre su árbol anillas aisladas unidas a diferentes puntos del devanado inducido. Si hay dos anillas unidas a dos puntos diametralmente opuestos del devanado, la conmutatriz es monofásica, mientras que es trifásica si lleva tres anillas unidas a tres puntos equidistantes, es decir, a 120° uno de otro; si tiene cuatro anillas unidas a cuatro puntos es tetrafásica, y es exafásica si tiene

seis anillas unidas a seis puntos equidistantes. En la figura 204 se ve en esquema una conmutatriz trifásica, y en la figura 205 se ve una conmutatriz con dinamo.

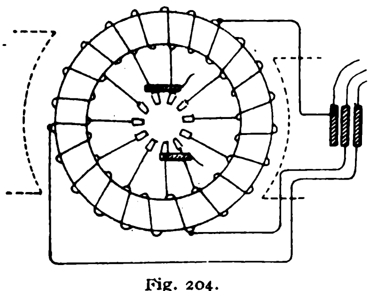


Fig. 204.

Si se alimenta una de estas máquinas, como motor, por una corriente continua, desarrolla entre sus anillas tensiones alternas; al contrario, si se mueve alimentándola con corrientes alternas y excitándola con corriente continua, se podrá recoger entre las escobillas que se apoyan sobre el colector una corriente con-

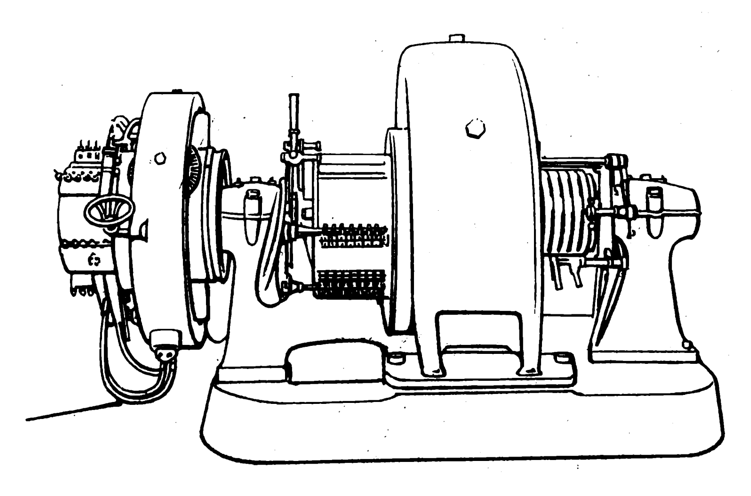


Fig. 205.

tinua. Generalmente se aplican las conmutatrices a transformar las corrientes alternas en continua; en

este caso, por su misma construcción obra como un motor sincrónico que mueve a un generador de corriente continua.

Relación de transformación en vacío. —Es la relación entre la tensión eficaz aplicada y la tensión continua en vacío. Para calcular el valor de esta relación consideremos dos puntos A y B del inducido tales que el ángulo AOB sea igual a $2a$ (figura 206), y calculemos el valor máximo de la f. e. m. alterna desarrollada entre estos dos puntos cuando el inducido gira a la velocidad de N vueltas por segundo, en un campo inductor tal que el flujo total a través del núcleo sea Φ.

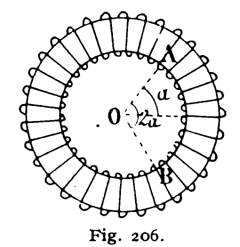


Fig. 206.

Al estudiar las máquinas de corriente continua hemos visto que la f. e. m. inducida en una espira es máxima cuando esta espira pasa por un polo, que disminuye

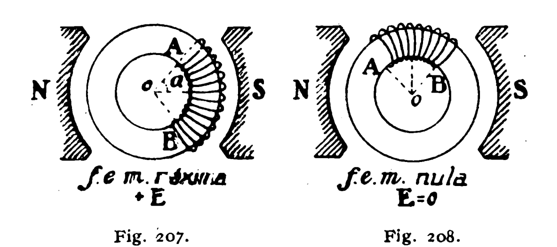


Fig. 207. Fig. 208.

poco a poco cuando va del polo a la línea neutra siguiente y que cambia de sentido cuando pasa por la línea neutra. De aquí resulta que la f. e. m. inducida entre los puntos A y B es máxima cuando la bisectriz del ángulo AOB pasa por el eje de un polo (fig. 207), que disminuye poco a poco hasta cero cuando dicha bisectriz se confunde con la línea neutra, porque en

esta posición, en la mitad de las espiras se tiene una f. e. m. dirigida en un sentido, y en la otra mitad otra f. e. m. igual a la primera y de sentido contrario (figura 208). Cuando la bisectriz del ángulo AOB llega frente al polo siguiente, la f. e. m. vuelve a ser máxima

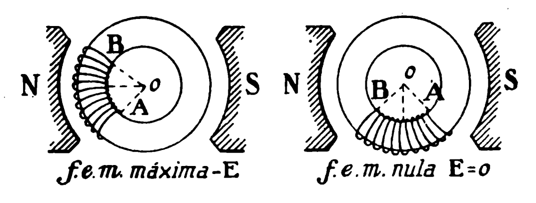


Fig. 209.   Fig. 210.

y de sentido contrario al que tenía en la primera posición, y así sucesivamente (figs. 209 y 210).

De aquí se deduce que entre A y B se origina una f. e. m. alterna cuyo período es el tiempo que tarda la bisectriz del ángulo AOB en pasar de un polo norte al polo norte siguiente; la frecuencia de esta f. e. m. es N si la máquina es bipolar, y pN si tiene $2\,p$ polos.

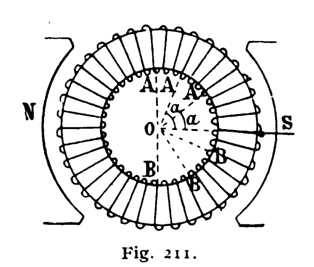


Fig. 211.

Supongamos que el ángulo AOB sea igual a 180°, es decir, que A y B sean diametralmente opuestos; la f. e. m. desarrollada entre estos dos puntos es máxima cuando A y B están sobre la línea neutra, confundiéndose la bisectriz del ángulo AOB con el eje de los polos, y ya hemos visto que en este caso la f. e. m. tiene por valor $E = \frac{Nn\Phi}{10^8}$ volts. Si A y B se acercan, es decir, si el ángulo AOB disminuye de tal modo que su bisectriz se confunda con el eje de los polos (fig. 211), el

número de espiras comprendidas entre A y B disminuye poco a poco, de modo que la f. e. m. inducida entre estos dos puntos baja de $\frac{Nn\Phi}{10^8}$ hasta cero cuando el ángulo AOB disminuye de 180 hasta 0°, es decir, cuando a disminuye de 90° a 0°.

Por lo tanto, se puede admitir que el valor de la f. e. m. máxima inducida entre los extremos de las espiras comprendidas en un ángulo de valor $2a$ es proporcional al seno del ángulo a y está dada por la expresión $\frac{Nn\Phi}{10^8}$ sen a, puesto que para $a = 90°$ es igual a $\frac{Nn\Phi}{10^8}$, siendo nula para $a = 0°$.

Partiendo de este supuesto, si se aplica entre las escobillas que se apoyan sobre el colector una tensión continua U volts, se sabe que a causa de la caída de tensión en el inducido (que es muy pequeña) se produce una fuerza contraelectromotriz de valor $\frac{Nn\Phi}{10^8} = U$ entre las escobillas, es decir, entre los dos puntos del inducido que se encuentran sobre la línea neutra; además, también sabemos que entre dos puntos del inducido que forman entre sí un ángulo $2a$ se desarrolla una f. e. m. alterna de valor máximo $E_{max} \frac{Nn\Phi}{18^8}$ sen a. Por consiguiente:

$$E_{max} = U \text{ sen } a \quad \text{y} \quad F_{ef} = \frac{U \text{ sen } a}{\sqrt{2}}.$$

En el caso de una conmutatriz monofásica, $2a = 180°$, $a = 90°$ y sen $a = 1$; luego:

$$E_{ef} = \frac{U}{\sqrt{2}} \text{ y la relación de transformación será } \frac{E_{ef}}{U} = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Si la conmutatriz es trifásica, $2a = 120^\circ$, $a = 60^\circ$ y sen $a = \frac{\sqrt{3}}{2}$; luego:

$$E_{ef} = \frac{U\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \text{ y la relación de transformación: } \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}};$$

si la conmutatriz fuera tetrafásica, $2a = 90^\circ$, $a = 45^\circ$ y sen $a = \frac{1}{\sqrt{2}}$; por lo cual se tendría:

$$E_{ef} = \frac{U}{2} \text{ y la relación de transformación: } \frac{1}{2}.$$

Finalmente, si la conmutatriz es exafásica, se tiene $2a = 60^\circ$, $a = 30^\circ$ y sen $a = 1/2$; luego:

$$E_{ef} = \frac{U}{2\sqrt{2}} \text{ y la relación de transformación es: } \frac{1}{2\sqrt{2}}.$$

Medio mnemotécnico para hallar las fórmulas. — Se traza un círculo de diámetro $\frac{U}{\sqrt{2}}$ y se divide en tantas partes iguales como fases haya (2 para una conmutatriz monofásica, 3, 4 y 6 para una conmutatriz

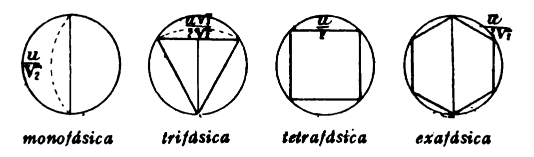


Fig. 212.

tri, tetra o exafásica). Se unen los puntos sucesivos de división, y los lados del polígono resultante representan la tensión compuesta, siendo el radio la tensión estrellada medida en la misma escala (fig. 212).

OBSERVACIÓN. — Se demuestra que para una misma potencia continua, recogida entre las escobillas de una conmutatriz, la corriente en las espiras del inducido es tanto más pequeña cuanto mayor es el número de fases; por lo tanto, la potencia de una conmutatriz es tanto más grande cuanto mayor es el número de fases (tomo I, cap. XIX). Por esta razón se emplean de preferencia las conmutatrices exafásicas en vez de las tetra o trifásicas.

Para alimentar con una línea trifásica una conmutatriz exafásica, se utiliza un transformador cuyos circuitos primarios, montados en estrella o en triángulo,

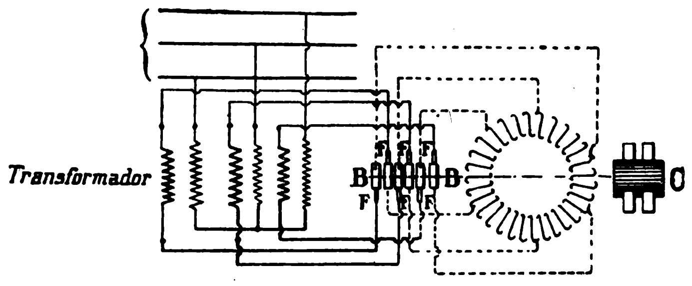


Fig. 213. — (- - - conexiones interiores; ——— conexiones exteriores.)

estén unidos a las líneas y cuyos secundarios tengan sus seis extremos libres; los extremos de una misma fase del transformador están unidos a dos puntos del inducido de la conmutatriz diametralmente opuestos (figura 213: *B*, anillas; *F*, frotadores; *C*, colector).

Regulación de la tensión continua. — Cuando la corriente producida por la conmutatriz aumenta, la tensión continua entre las escobillas disminuye, y puede darse el caso de querer que esta corriente se mantenga constante mediante una regulación conveniente. Esta regulación no puede hacerse actuando

sobre la corriente de excitación de la conmutatriz, sino que es preciso actuar sobre la tensión alterna aplicada entre las anillas. Para conseguirlo se acopla con el árbol de la conmutatriz, entre las anillas y el inducido, un alternador cuyo devanado sea tal que las fuerzas electromotrices de los dos inducidos (el del alternador y el de la conmutatriz) estén siempre en fase o siempre en oposición. Es evidente que las dos máquinas movidas por el mismo árbol tienen el mismo número de polos inductores. Actuando sobre la excitación del alternador se puede sumar, a la tensión entre líneas, la tensión variable del alternador, que obra de este modo como elevador de tensión.

También puede montarse sobre el árbol una dinamo de corriente continua en serie con la tensión continua de la conmutatriz; se regula la tensión continua por la excitación de esta dinamo que obra como un elevador de tensión de corriente continua (fig. 205).

Regulación automática. — Se puede mantener constante la tensión continua de un modo automático cuando las variaciones de la corriente no son muy grandes; para ello se intercala entre el alternador y la conmutatriz un carrete de autoinducción de resistencia óhmica despreciable. Sea U el valor eficaz de la tensión constante a que está alimentada la conmutatriz. Sean, al cabo de un cierto tiempo: u esta tensión, u' la tensión entre los extremos del carrete de autoinducción y u_1 la tensión entre las anillas de la conmutatriz (figura 214); se tiene:

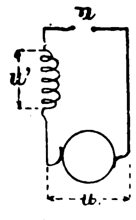


Fig. 214.

$$u = u' + u_1.$$

Representando geométricamente esta relación, se obtiene el diagrama de la figura 215; $O A$ es el vector

representativo de la corriente I; OB representa u', vale $U'_{ef} = \mathcal{L}\omega I$ ($\mathcal{L}$ es el coeficiente de autoinducción del carrete) y está defasado 90° en adelanto sobre I; OC representa u_1 y está defasada en adelanto un ángulo φ sobre I; la resultante OD representa la tensión aplicada U.

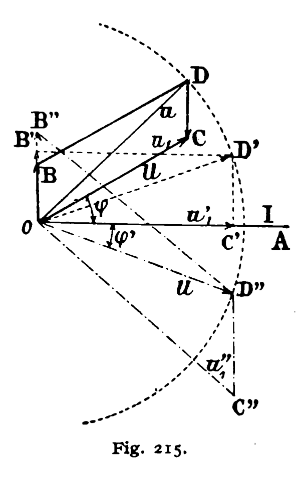


Fig. 215.

Si la corriente continua producida crece, la tensión entre las escobillas tiende a disminuir, y para mantenerla constante hay que aumentar la tensión u_1, para lo cual basta aumentar la excitación de la conmutatriz. En efecto, al aumentar la excitación, el defasaje φ disminuye hasta cero, después cambia de sentido y aumenta; el diagrama de la figura 215, trazado para defasajes φ en atraso, y nulo en adelanto φ', nos dice que permaneciendo constante la tensión U y tomando la corriente en la excitatriz los valores I, I', I'', tales que $\mathcal{L}\omega I = OB$, $\mathcal{L}\omega I' = OB'$, $\mathcal{L}\omega I'' = OB''$, la tensión entre las anillas toma los valores medidos por OC, OC', OC'', valores que crecen con la excitación. El aumento de la excitación, a la vez que el de la corriente continua producida, se consigue automáticamente devanando sobre los carretes inductores varias espiras en serie con el circuito por donde debe pasar la corriente producida por la conmutatriz.

EJEMPLO

Prueba de un motor sincrónico trifásico con cuatro polos, alimentado a una tensión eficaz constante de 120 volts y frecuencia de 50 períodos.

a) *Velocidad:* N vueltas por minuto:

$$\frac{2 \times N}{60} = 50, \qquad N = \frac{60 \times 50}{2} = 1500.$$

b) *Curvas en* V:

1.º *En vacío.* — El motor, marchando a la velocidad de régimen mediante un motor auxiliar, está cerrado sobre el alternador trifásico que debe alimentar en el momento en que las fases están en oposición; se hace variar la corriente de excitación y se anota el valor de la corriente en cada una de sus fases. De este modo se obtienen los siguientes resultados:

Corriente de excitación i	Corriente en el motor I
1,935 amperes	48 amperes
1,815 »	39 »
1,65 »	29 »
1,44 »	18 »
1,38 »	14,5 »
1,335 »	12 »
1,245 »	7,5 »
1,17 »	6,5 »
1,132 »	9 »
0,99 »	18,5 »
0,90 »	25 »
0,78 »	35 »
0,66 »	48 »

2.º *En carga.* — El motor está acoplado a una dinamo-freno cuyo brazo de palanca es de un metro, y la relación entre los diámetros de las dos poleas es tal que la dinamo-freno gira a razón de 1 650 vueltas por minuto. Se suspende del extremo de la palanca un peso de 3 Kg. y después uno de 6 Kg. correspondiendo en el primer caso un par de 3 Kgm. y una potencia de $1,03 \times 3 \times 1\,650$ watts (véase pág. 17) y en el segundo un par de 6 Kgm. y una potencia de 10 000 watts. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Potencia: 5 000 watts		Potencia: 10 000 watts	
Corriente de excitación	Corriente tomada por el motor	Corriente de excitación	Corriente tomada por el motor
1,93	57	1,84	70
1,78	52	1,24	58
1,15	36	1,05	59
0,99	39,5	0,87	65
0,75	54		
0,645	62		

Estos resultados están representados geométrica-

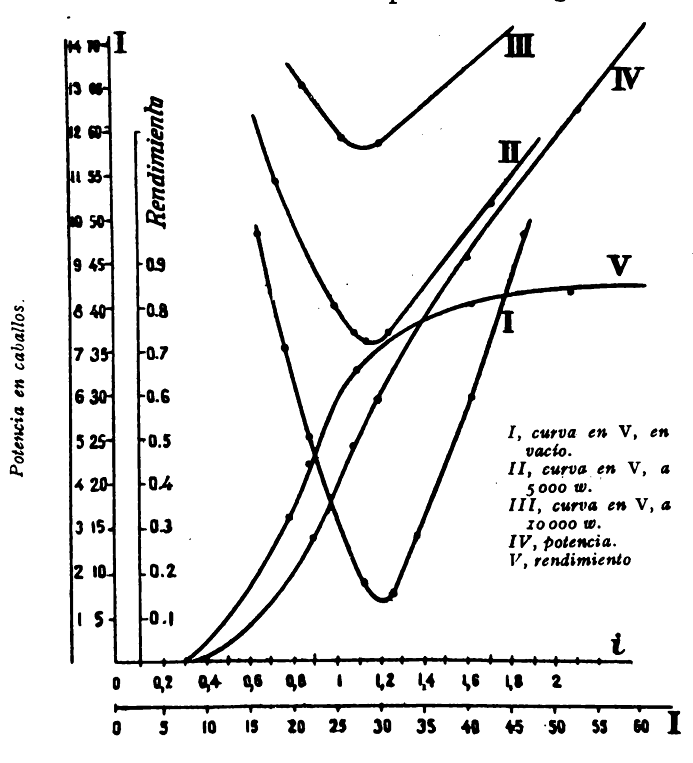


Fig. 216.

mente por las curvas en V (I, II, III) de la figura 216.

Se ve en esta figura que el mínimo de corriente tomada por el motor tiene lugar aproximadamente cuando la corriente de excitación es de 1,2 amperes, cualquiera que sea la carga.

c) *Rendimiento*. — Siendo la corriente de excitación constantemente igual a 1,2 amperes, se aumenta poco a poco la carga; en estas condiciones, el defasaje de la corriente sobre la tensión es casi nulo. Se hace girar primero el motor en vacío, y después se colocan cada vez más pesos en el extremo del brazo de palanca de la dinamo-freno. Los resultados que se obtienen son los siguientes:

Velocidad: 1500 vueltas por minuto. Excitación: 1,2 amperes

Peso Kg.	Par Kgm.	POTENCIA en la polea — en caballos	en watts W	Corriente en el motor I	Potencia suministrada al motor W' $\overline{UI\sqrt{3}} = 120\sqrt{3}I$	Rendimiento $\rho = \frac{W}{W'}$
0,000	0,0	0,00	0	8	1 663	0,000
0,800	0,8	1,84	1 354	20	4 157	0,325
1,200	1,2	2,76	2 131	22	4 572	0,445
2,100	2,1	4,84	3 562	27	5 612	0,636
2,500	2,5	5,76	4 239	30	6 235	0,68
3,400	3,4	7,85	5 778	36	7 482	0,77
4,000	4,0	9,21	6 778	42	8 729	0,78
4,700	4,7	10,82	7 963	48	9 976	0,80
5,400	5,4	12,45	9 163	54	11 223	0,82
6,200	6,2	14,30	10 525	61	12 678	0,83

Las curvas IV y V de la figura 216 representan geométricamente estos resultados; la primera da los valores de la potencia en caballos recogida sobre la polea del motor, en función de la corriente en el motor, y la segunda da los valores del rendimiento también en función de dicha corriente.

Empleo de la curva en V para el trazado del diagrama de Potier

Para determinar el punto de la característica en dewattada correspondiente a la corriente para la cual se quiere conocer la caída de tensión, se puede utilizar la curva en V del alternador funcionando como motor sincrónico. En efecto, cuando la máquina, alimentada en estas condiciones bajo su tensión de régimen como alternador, absorbe la corriente de carga, la potencia tomada es despreciable y la corriente puede considerarse como dewattada (lo mismo que si se hace pasar la corriente del alternador por un carrete de autoinducción cuya resistencia óhmica no puede ser rigurosamente nula). La corriente de excitación para la cual el alternador da una corriente dewattada *I* bajo una tensión *U* es, por lo tanto, sensiblemente la misma que aquella para la cual la máquina absorbe la corriente *I*, girando como motor sincrónico bajo esta tensión *U*.

Por consiguiente, se procede de este modo:

1.° Se traza la curva en V en vacío manteniendo la tensión constante y leyendo para los valores de la corriente de excitación que se hace variar, los valores correspondientes de la corriente absorbida. Esta curva permite determinar la corriente de excitación *i* para la cual la máquina produce la corriente dewattada *I*, bajo la tensión *U*.

2.° Se traza la ordenada del punto así determinado, que corta a la paralela al eje de las abscisas de ordenada *U* en un punto que está sobre la caracte-

rística en dewattada trazada manteniendo constante la corriente I (fig. 217).

Las gráficas de la figura 218 corresponden a un alternador trifásico de 5 200 volts, 760 amperes, 25 períodos y 1 500 vueltas por minuto. La curva I es la

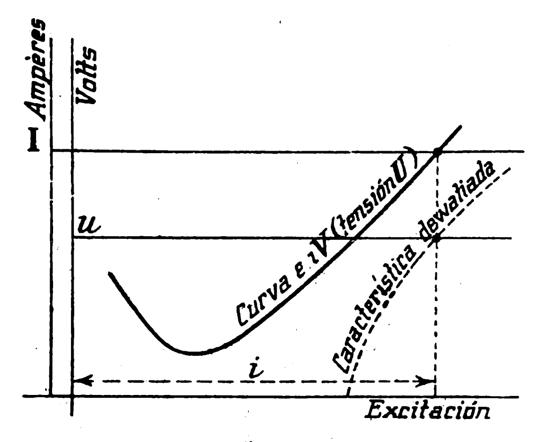


Fig. 217.

característica en vacío, la curva II es la característica en cortocircuito, y la III es la curva en V, en vacío, a la tensión de 5 200 volts.

Para tener la caída de tensión para 760 amperes, a la tensión de 5 200 volts, se hace lo siguiente:

1.º Se determina la abscisa $OP' = 236$ amp. del punto A de la característica en cortocircuito, para $I = 760$, la cual da el origen de la característica en dewattada;

2.º Se marca el punto B de la curva en V cuya ordenada es 760 amperes, y se determina el punto de encuentro de la ordenada que pasa por este punto con la paralela al eje de las abscisas cuya ordenada es 5 200 volts;

3.º A partir del punto P así obtenido, se lleva

sobre la paralela al eje de las abscisas una longitud $PV = OP'$ y por V se traza la paralela a la parte rectilínea de la característica en vacío, la cual da el

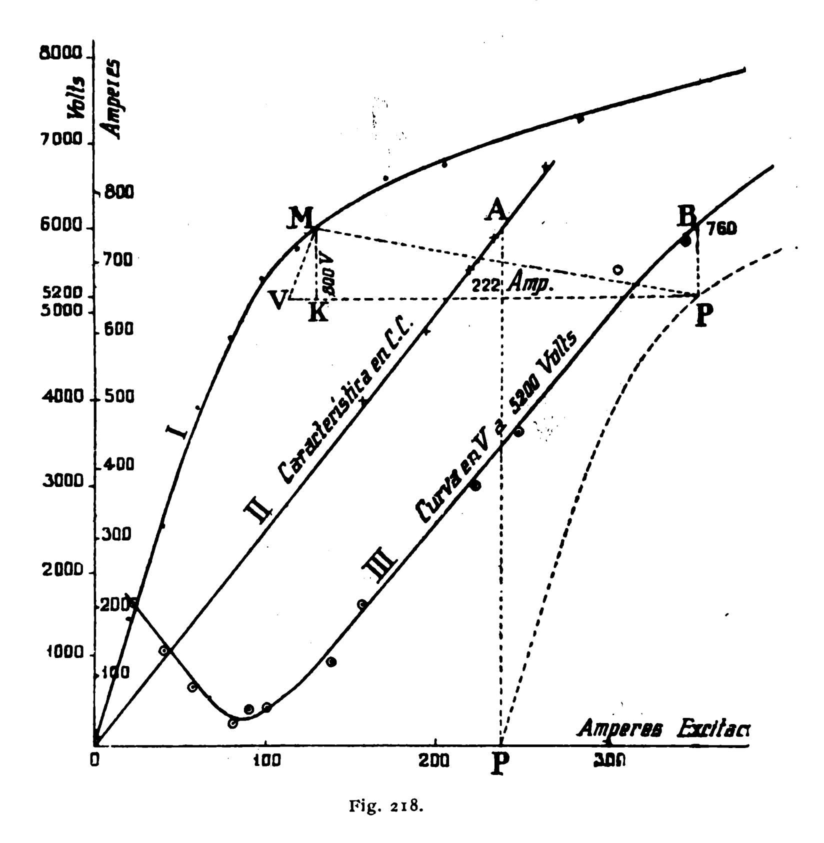


Fig. 218.

punto M, por el cual se traza MK, perpendicular a PV.

MK mide $s\omega I$, y PK mide mI. A continuación se procede como se indicó en la página 223.

CAPÍTULO XIII

Motores asincrónicos

Sabemos que un motor asincrónico polifásico está constituído por un devanado fijo polifásico llamado *estator* o *circuito primario*, y por un devanado móvil polifásico que puede girar dentro del estator, cerrado sobre sí mismo y que se llama *rotor* o *circuito secundario*; los dos devanados tienen igual número de polos.

El circuito primario, que está alimentado bajo una tensión polifásica, trifásica, por ejemplo, de frecuencia N, es decir, de pulsación $\omega = 2\,\pi\,N$, da origen a un campo giratorio de magnitud constante y de velocidad igual a $\frac{N}{p}$ vueltas por segundo, si el devanado primario es tal que produce un campo de $2\,p$ polos (tomo I, página 508). La velocidad angular de este campo es evidentemente $\frac{\omega}{p}$, puesto que durante un segundo el campo da $\frac{N}{p}$ vueltas, es decir, describe un ángulo $\frac{N}{p} \times 2\,\pi$.

Para simplificar en lo posible la cuestión, consideraremos el caso de un devanado que da origen a un campo giratorio de dos polos, siendo entonces su velo-

cidad angular igual a la pulsación ω de la tensión primaria y por consiguiente de la corriente en el circuito primario.

A causa de las variaciones de flujo producidas por este campo giratorio en el devanado secundario, se origina una fuerza electromotriz inducida en este devanado, que, por lo tanto, es recorrido por una corriente inducida. Entre la corriente inducida en el secundario y el campo giratorio creado por la corriente primaria se desarrollan acciones mecánicas, quedando el motor sometido a un par que le hace mover en el sentido del campo. Sea ω' la velocidad angular que adquiere el rotor; esta velocidad es menor que la angular ω del campo giratorio porque si ω' llegara a ser igual a ω, el campo giratorio inductor y el circuito inducido conservarían la misma posición relativa, el flujo a través de las espiras secundarias no variaría, no produciéndose por lo tanto ninguna f. e. m., y en consecuencia no habría corriente en el secundario, que no estaría sujeto a ninguna acción mecánica, y que por consiguiente no se movería.

La diferencia entre la velocidad angular del campo y la del rotor es $\omega - \omega'$, y se llama resbalamiento del motor a la relación:

$$g = \frac{\omega - \omega'}{\omega}.$$

Supongamos una espira del rotor formada por un cuadro cerrado sobre sí mismo que se encuentra en un campo de magnitud constante, girando con una velocidad angular igual a la pulsación ω de la corriente primaria. En esta espira se produce una corriente alterna inducida, corriente que da lugar a un campo alterno que produce a su vez variaciones de flujo a través de la espira, y por lo tanto que da lugar a una corriente alterna

que se compone con la primera corriente. El campo creado por la corriente en el cuadro se compone con el campo giratorio inductor dando un campo resultante que es el que produce finalmente la corriente en la espira. Por consiguiente, si consideramos el campo resultante, no hay necesidad de tener en cuenta la autoinducción en la espira, porque el flujo desarrollado en esta espira es una de las componentes del flujo resultante; luego la corriente en cada espira está en fase con la f. e. m. inducida en dicha espira.

De aquí se deduce que el flujo creado por la corriente en el rotor está en fase con esta corriente y por lo tanto con la f. e. m. inducida por el flujo resultante. Ahora bien, sabemos que toda f. e. m. está defasada 90° en atraso respecto al flujo que la produce; luego: *el flujo propio del rotor está defasado 90° sobre el flujo resultante que atraviesa al rotor.*

Diagrama de los flujos. — La corriente I_1 en el circuito primario produce un flujo del cual una parte Φ_1 atraviesa el circuito secundario; el flujo total producido por la corriente I_1 y que atraviesa el circuito primario es evidentemente mayor que Φ_1, por lo cual lo representaremos por $v_1\Phi_1$, siendo v_1 un coeficiente mayor que la unidad; la parte $v_1\Phi_1 - \Phi_1 = \Phi_1 (v_1 - 1)$ representa el flujo de escape que se cierra por el aire sin atravesar el secundario (fig. 219). Análogamente, la corriente I_2 en el secundario produce un flujo total del cual una

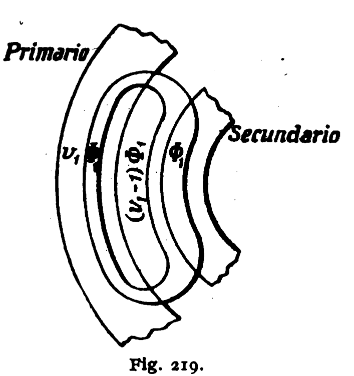


Fig. 219.

parte Φ_2 solamente se cierra por el primario, mientras que la otra parte $(v_2 - 1)\ \Phi_2$ se cierra a través del entrehierro. De aquí resulta que el circuito primario es atravesado por dos flujos: 1.º el flujo $v_1\Phi_1$ producido por la corriente primaria I_1; 2.º el flujo Φ_2 producido por la corriente secundaria I_2; estos dos flujos se componen dando un flujo resultante F_1 a través del primario.

El circuito secundario es atravesado por los dos flujos $v_2\Phi_2$ y Φ_1 que se componen dando un flujo resultante F_2.

Los circuitos magnéticos del estator y del rotor están poco saturados, de modo que los flujos Φ_1 y $v_1\Phi_1$, Φ_2 y $v_2\Phi_2$ son proporcionales a las corrientes I_1 y I_2 que los producen, pudiéndose establecer las siguientes igualdades:

$$\Phi_1 = K_1 I_1 \quad \text{y} \quad \Phi_2 = K_2 I_2.$$

Claro está que estos flujos están en fase con las corrientes.

Los flujos $v_2\Phi_2$ y Φ_2 están defasados 90º sobre el flujo resultante F_2, según lo que hemos dicho anteriormente.

Para representar los diferentes flujos en los circuitos primario y secundario del motor, se toma como origen de las fases la fase de F_2, y sea OA el vector que representa a F_2 (fig. 220), Φ_2 y $v_2\Phi_2$ estarán representados por los vectores OB y OC perpendiculares a OA. Puesto que F_2 es la resultante de $v_2\Phi_2$ y de Φ_1, el vector OD que representa Φ_1 se obtendrá tomando AD igual y paralelà a CO; llevando sobre una longitud igual a $v_1\Phi_1$ se obtendrá el vector que representa a $v_1\Phi_1$. La resultante OF de Φ_2 y de $v_1\Phi_1$ representa el flujo resultante F_1 en el primario.

El valor eficaz del flujo resultante F_1 es constante, es decir, que es el mismo cualquiera que sea la carga del motor, y por consiguiente cualquiera que sea la corriente I_1 en el primario si la tensión U_1 aplicada en los bornes del motor es constante. En efecto, el flujo F_1 da origen a una f. e. m. inducida E_1 en el circuito primario, pero la tensión aplicada está en cada instante equilibrada por esta f. e. m. desarrollada y por la caída óhmica en el circuito; además, la resistencia de este circuito es muy pequeña, por lo cual la caída óhmica es también muy pequeña, resultando despreciable en comparación con la f. e. m. E_1 que, por consiguiente, es casi igual a U_1, es decir, que es constante. Luego el flujo F_1, que produce una f. e. m. constante, es también constante en valor eficaz.

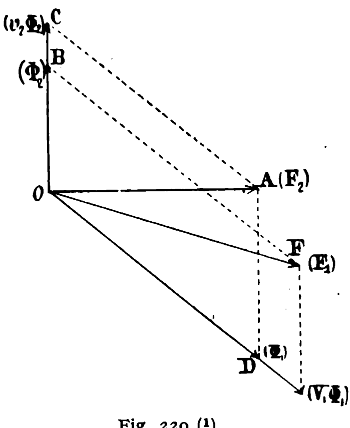


Fig. 220 (1).

Par motor. — Consideremos, por ejemplo, un motor en que tanto el estator como el rotor estén constituídos por tres circuitos trifásicos en estrella. Sea U_1 el valor eficaz de las tensiones entre las líneas que conducen la corriente al motor, I_1 la corriente en cada línea; en

(1) En este diagrama y en los siguientes, Φ_2 y $v_2\Phi_2$ deberían estar defasados en atraso, es decir, que OB y OC debieran estar dirigidos hacia abajo, pero este cambio de orientación en los diagramas no altera en nada los resultados y consecuencias a que dan lugar.

estas condiciones, la potencia tomada por el motor es:

$$3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} I_1 \cos \varphi_1, \quad \text{o sea:} \quad \sqrt{3} \cdot U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

o también:

$$W_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 I_{1w},$$

siendo I_{1w} la componente wattada (corriente energética) de la corriente I.

El rotor está sometido a un par C que lo mueve con una velocidad angular ω' de modo que la potencia recogida sobre la polea del motor es:

$$W' = C\omega'.$$

Supongamos que el rotor esté sujeto, de modo que no pueda girar; la velocidad del flujo a través del devanado secundario es ω, mientras que estando el rotor en marcha, es $\omega - \omega'$; como la velocidad del flujo aumenta, la f. e. m. inducida en el secundario aumenta al mismo tiempo, y, por lo tanto, la corriente. Se puede mantener constantemente igual a I_2 la corriente secundaria cerrando los devanados sobre resistencias, en vez de cerrarlos en cortocircuito, como se hace durante la marcha. Sea R_2 la resistencia de cada rama del secundario, y R'_2 la resistencia de cada circuito del reostato sobre que se cierra aquél. La potencia en el rotor es la misma cuando gira que cuando está parado en las condiciones indicadas, porque el flujo en el primario debido a la corriente secundaria no ha cambiado, ya que se ha conservado la misma corriente I_2 y la tensión U_1 permanece constante; por lo tanto, nada ha variado, ni la corriente ni la potencia comunicada al motor. Pero esta potencia, en vez de producir un efecto mecánico, se transforma en calor en el reostato, y tiene por valor 3 $R'_2 I_2^2$. Se tiene por consiguiente:

$$C\omega' R = 3\, R'_2 I_2^2.$$

Pero, por otra parte, la potencia comunicada al motor es igual a la que se recoge en el rotor (despreciando las pérdidas por histeresis y por efecto Joule en el rotor), o sea $3\,(R_2 + R'_2)\,I_2^2$.

Luego se tiene:

potencia comunicada al motor . . . . $\sqrt{3}\cdot U_1 I_{1w}$
potencia recogida en el rotor . . . . $3\,(R_2 + R'_2) I^2_2$

de donde:

$$\sqrt{3}\cdot U_1 I_{1w} = 3\,(R_2 + R'_2) I^2_2.$$

Si el motor girase, la potencia que se podría utilizar en su polea sería:

$$C\omega' = 3\,R'_2 I^2_2.$$

Dividiendo este valor por el anterior, resulta:

$$\frac{C\omega'}{\sqrt{3}\cdot U_1 I_{1w}} = \frac{R'_2}{R_2 + R'_2}$$

(1) $$C = \frac{\sqrt{3}\cdot U_1 I_{1w}}{\omega'}\cdot\frac{R'_2}{R_2 + R'_2}.$$

Siendo el flujo el mismo en el rotor, tanto si gira como si está parado (ya que las corrientes primaria y secundaria son las mismas), las fuerzas electromotrices inducidas en el secundario en ambos casos son proporcionales a las velocidades relativas del campo respecto a la del rotor. Estando parado el rotor, su velocidad es cero, la velocidad relativa del campo resultante es igual a la frecuencia de la corriente primaria, y la f. e. m. inducida en el secundario tiene por valor:

$$E_2 = K\omega.$$

La corriente secundaria es:

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2 + R'_2} = \frac{K\omega}{R_2 + R'_2}$$

porque en este caso el secundario está cerrado sobre el reostato de resistencia R'_2.

Cuando gira el rotor, y siendo su velocidad ω', la velocidad relativa del campo resultante es $\omega - \omega'$ y la f. e. m. inducida es:

$$E'_2 = K(\omega - \omega').$$

Como el secundario está entonces cerrado en corto-circuito, se tiene:

$$I_2 = \frac{K(\omega - \omega')}{R_2};$$

luego:

$$\frac{K\omega}{R_2 + R'_2} = \frac{K(\omega - \omega')}{R_2},$$

o bien:

$$\frac{\omega}{R_2 + R'_2} = \frac{\omega - \omega'}{R_2} = \frac{\omega'}{R'_2};$$

de donde:

$$\frac{R'_2}{R_2 + R'_2} = \frac{\omega'}{\omega},$$

y sustituyendo este valor de $\frac{R'_2}{R_2 + R'_2}$ en la expresión (1), se tiene:

$$(2) \qquad C = \frac{\sqrt{3} \cdot U_1 I_{1w}}{\omega'} \times \frac{\omega'}{\omega} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_1 I_{1w}}{\omega};$$

de donde:

$$C\omega = \sqrt{3} \cdot U_1 I_{1w}.$$

Observación. — El valor de C dado por la relación (1) es demasiado grande. En efecto, al decir que:

$$\sqrt{3} \cdot U_1 I_{1w} = 3\,(R_2 + R'_2) I^2_2$$

hemos admitido que la potencia comunicada al motor $\sqrt{3}\, U_1 I_{1w}$ se transformaba completamente en calor

en el reostato. Pero en realidad, una parte de esta potencia es absorbida por histeresis y corrientes de Foucault, y otra parte por efecto Joule en el estator, de modo que si W representa la suma de estas pérdidas, se tiene:

$$\sqrt{3} \cdot U_1 I_{1w} = 3\,(R_2 + R'_2) I_2^2 + W,$$

y se tendría para valor exacto del par:

$$C = \frac{\sqrt{3} \cdot U_1 I_{1w}}{\omega'} \times \frac{3\,R'_2 I_2^2}{3\,(R_2 + R'_2) I_2^2 + W}.$$

que, como se ve, es inferior al valor dado por la relación (1).

Diagrama circular de Heyland. — Partamos del diagrama de los flujos (figura 221); por E tracemos una paralela a OA, que cortará a la prolongación de OF en un punto M; la longitud OM es constante, es decir, independiente de la corriente I_1 tomada por el motor. En efecto, los triángulos OKD y OFE, semejantes, dan:

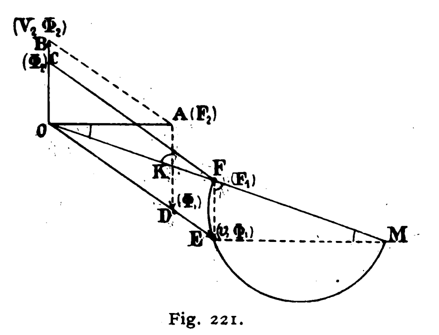


Fig. 221.

$$\frac{OK}{OF} = \frac{KD}{EF} = \frac{OD}{OE} \quad \text{o sea} \quad \frac{OK}{F_1} = \frac{KD}{\Phi_2} = \frac{\Phi_1}{v_1 \Phi_1};$$

de donde:

$$OK = \frac{F_1}{v_1}; \qquad KD = \frac{\Phi_2}{v_1};$$

y por lo tanto:

$$AK = AD - KD = v_2 \Phi_2 - \frac{\Phi_2}{v_1}.$$

De la semejanza de los triángulos OAK y FEM se deduce:

$$(1) \qquad \frac{FM}{OK} = \frac{EF}{AK} = \frac{EM}{OA};$$

o sea:

$$\frac{FM}{\frac{F_1}{v_1}} = \frac{\Phi_2}{v_2\Phi_2 - \frac{\Phi_2}{v_1}};$$

de donde:

$$FM = \frac{\Phi_2 F_1}{v_1 v_2 \Phi_2 - \Phi_2} = \frac{F_1}{v_1 v_2 - 1},$$

Por ser constantes F_1, v_1 y v_2, FM es también constante. Se ve además que siendo el triángulo FME rectángulo en E, este punto E se encuentra en la circunferencia descrita sobre FM como diámetro.

De este modo, cuando la carga varía y por lo tanto cuando varía la corriente I_1, la recta OF tiene una longitud constante F_1, y FM tiene también una longitud invariable igual a $\frac{F_1}{v_1 v_2 - 1}$, de tal manera, que los diversos valores del flujo $v_1\Phi_1$ están medidos por longitudes tales como OE, OE_1, OE_2, OE_3... (figura 222).

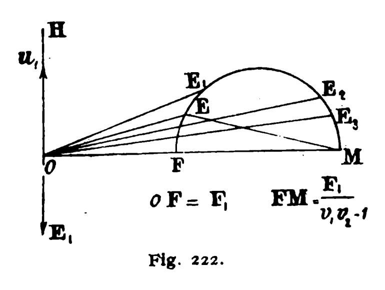


Fig. 222.

Ahora bien, como hemos dicho, los circuitos magnéticos están poco saturados, por lo cual los flujos Φ_1 y $v_1\Phi_1$ son proporcionales a la corriente I_1 y están en fase con ella. Por consiguiente, podremos construir un triángulo $O'E'F'$ semejante al OEF, en el que el lado $O'E'$, homólogo de OE, mida la corriente primaria I_1; los otros dos lados $O'F'$ y $E'F'$

son proporcionales a OF y EF, es decir, a F_1 y a Φ_2. Si se toma $F'M' = \frac{O'F'}{v_2 v_1 - 1}$, la longitud $F'M'$ será constante, así como la $O'F'$, y el punto E' se moverá sobre una circunferencia descrita sobre $F'M'$ como diámetro, al variar la corriente I_1. Por otra parte, la f. e. m. E_1 producida en el primario por el flujo resultante F_1, está defasada 90° en atraso respecto a F_1, y por lo tanto, la tensión u_1, igual y opuesta a E_1 (puesto que suponemos despreciable la caída óhmica) estará defasada 90° en adelanto sobre F_1, estando representada por el vector OH en el diagrama de los flujos (figura 222) y por $O'H'$ en el diagrama de las corrientes (fig. 223). De aquí se deduce que el ángulo $H'O'E'$ es el ángulo φ_1 de defasaje de la corriente I_1 sobre la tensión u_1, y que la proyección $O'P' = E'N'$ mide la componente wattada I_{1w} de la corriente I_1, así como $O'N'$ mide la componente dewattada o magnetizante I_{1m}.

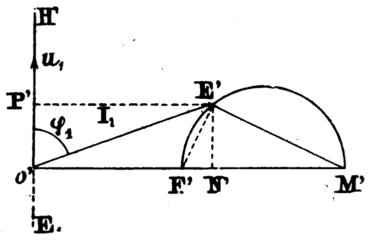


Fig. 223.

OBSERVACIÓN. — De las igualdades (1) y (2) (páginas 295 y 296) se deduce:

$$\frac{EM}{OA} = \frac{\Phi_2}{v_2\Phi_2 - \frac{\Phi_2}{v_1}},$$

o sea:

$$\frac{EM}{F_2} = \frac{v_1}{v_1 v_2 - 1}$$

de donde:

$$EM = F_2 \times \frac{v_1}{v_1 v_2 - 1}$$

Por consiguiente, la longitud EM es proporcional al flujo resultante F_2 en el rotor, resultando que $E'M'$, proporcional a EM, es también proporcional a F_2.

Construcción del círculo $F'\,E'\,M'$. — Para construir este círculo basta determinar dos valores particulares de la corriente primaria y sus defasajes; para ello se toman corrientes que correspondan a una carga muy pequeña del motor, y que puedan por lo tanto obtenerse con poca potencia; estas corrientes son la corriente en vacío I_0 y la corriente en cortocircuito I_c.

La corriente en vacío y su defasaje sobre la tensión U_1 se obtienen disponiendo en el circuito que alimenta al motor un amperímetro y un wattímetro con su conmutador, o tres resistencias convenientes para tomar un punto neutro artificial, o también dos wattímetros, en el caso de corrientes trifásicas. El amperímetro da I_0 y el wattímetro:

$$W_0 = \sqrt{3} \cdot U_1 I_0 \cos \varphi_0;$$

de donde:

$$\cos \varphi_0 = \frac{W_0}{\sqrt{3} \cdot U_1 I_0}$$

Para obtener la corriente en cortocircuito y su defasaje sobre U_1, se dispone el amperímetro y el o los wattímetros como antes; se para, mediante un freno por ejemplo, la polea del motor y se anota la intensidad I_c y la potencia indicada W_c teniéndose:

$$W_c = \sqrt{3} \cdot U_1 I_c \cos \varphi_c;$$

de donde:

$$\cos \varphi_c = \frac{W_c}{\sqrt{3} \cdot U_1 I_c}.$$

Una vez obtenidos estos valores, se traza una recta

que forme con un eje Oy el ángulo φ_0, y se toma sobre esta recta una longitud OE_0 que mida I_0 en una escala conveniente; después se traza otra recta que forme con Oy el ángulo φ_c y se toma sobre la misma una longitud OE_c que mida I_c en la misma escala que para I_0. Se une E_0 con E_c, y por el punto medio de E_0E_c se levanta una perpendicular a esta recta que cortará al eje Ox perpendicular a Oy, en un punto que será el centro de la circunferencia ya definida (fig. 224).

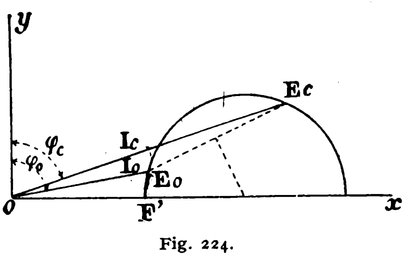


Fig. 224.

OBSERVACIÓN. — La recta OE_0 está muy poco inclinada sobre Ox, de modo que la perpendicular trazada desde E_0 a Ox, y que mide la componente dewattada de la corriente I_0, casi se confunde con E_0F', por lo cual la recta OF' mide la componente magnetizante de la corriente primaria en el motor marchando en vacío, y estando abierto el circuito secundario.

Utilización del diagrama circular para la determinación de las características del motor. — a) *Par motor.* — Hemos visto (pág. 296) que el valor del par motor desarrollado en el rotor, cuando la tensión aplicada tiene un valor eficaz U_1, la corriente en el estator un valor eficaz I_1 y la pulsación de esta corriente es ω, tiene por expresión:

$$C = \sqrt{3}\,\frac{U_1 I_{1w}}{\omega}.$$

Luego el par es proporcional a I_{1w}, ya que U_1 y ω son constantes.

Sea, por lo tanto, OE la longitud que mide I_1; la

perpendicular EN mide I_{1w}, luego el par C es proporcional a EN (fig. 225).

Pero en realidad el valor del par recogido en la polea del motor es menor que $\frac{\sqrt{3}\, U_1 I_{1w}}{\omega}$, puesto que hay que tener en cuenta: 1.º, las pérdidas debidas a la histeresis y a las corrientes de Foucault; 2.º, las pérdidas por efecto Joule en el estator (véase observación, página 296). Para tener en cuenta las primeras se puede admitir que tienen por valor la potencia tomada por el motor en vacío, es decir, cuando el circuito secundario está abierto.

Estas pérdidas corresponden a un par medido por la perpendicular trazada desde E_0 a OM (OE_0 representa la corriente I_0 en vacío), resultando que el par

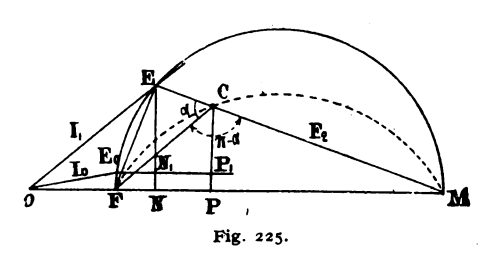


Fig. 225.

recogido en la polea está medido por la diferencia entre las longitudes de EN y de esta perpendicular, es decir, por EN_1.

La longitud $E\,M$ es proporcional al flujo resultante F_2 en el rotor (pág. 299). Se sabe que el par que actúa sobre un circuito recorrido por una corriente es proporcional al producto del flujo que lo atraviesa por la corriente, pero el flujo en el rotor es F_2 y la corriente que lo recorre es I_2, luego el par C desarrollado en el rotor es de la forma:

$$C = KF_2 I_2; \qquad C = K' I_2 \times EM.$$

Como, por otra parte, acabamos de ver que este par es proporcional a EN, se tiene:

$$C = K'' \times EN.$$

Por consiguiente:

$$K'I_2 \times EM = K'' \times EN. \tag{1}$$

Ahora bien, en el triángulo rectángulo FEM se tiene:

$$EF \times EM = EN \times FM, \tag{2}$$

puesto que cada uno de estos dos productos es igual al doble de la superficie de dicho triángulo. Dividiendo ordenadamente las igualdades (1) y (2), resulta:

$$\frac{K'I_2}{EF} = \frac{K''}{FM};$$

de donde:

$$EF = I_2 \frac{K'}{K''} FM.$$

Y como FM es constante, se ve que EF es proporcional a I_2.

Hay que tener en cuenta las pérdidas por efecto Joule en el estator, es decir, la caída de tensión R_1I_1 en el primario. El efecto de esta caída de tensión es la disminución del flujo secundario F_2, porque antes hemos admitido que el flujo resultante F_1 da origen a una f. e. m. igual a la tensión U_1 constante. En realidad esta f. e. m. es E_1, menor que U_1, porque sumada geométricamente a R_1I_1 debe dar como resultante U_1. Es evidente que mientras mayor sea la caída de tensión R_1I_1, más pequeña será la f. e. m. E_1, así como el flujo F_1 que la produce. Esta disminución de flujo primario es tanto más grande cuanto mayor es la corriente I_1, y como la disminución del flujo primario

da lugar a una disminución del flujo secundario, se puede tener en cuenta la caída de tensión en el primario, disminuyendo convenientemente el valor del flujo secundario.

En el triángulo OFE se ve que la corriente I_1 es la resultante de dos componentes OF y EF, siendo fija la primera y variando la segunda al variar I_1; se puede admitir que la disminución del flujo F_2 producida por la caída óhmica R_1I_1 en el primario es proporcional a la componente FE. Representemos esta disminución de F_2 por un vector EC dirigido sobre EM; según lo que acabamos de admitir, EC es proporcional a FE, luego $\frac{EF}{EC}$ es constante, y siendo α el ángulo FCE se tiene:

$$EF = EC \operatorname{tg} \alpha; \qquad \operatorname{tg} \alpha = \frac{EF}{EC};$$

donde se ve que el ángulo α es constante, y por lo tanto, su suplementario FCM también lo es. De aquí resulta que el punto C se encuentra sobre el arco de círculo que pasa por F y M y es capaz del ángulo $\pi - \alpha$.

El par desarrollado en el rotor queda disminuído por la disminución del flujo F_2, y es proporcional al producto del nuevo flujo por la corriente I_2, es decir, a $CM = I_2$.

Si no se tiene en cuenta la caída óhmica en el estator, el par motor desarrollado en el rotor tiene por valor:

$$C = K \times EM \times I_2.$$

Teniendo en cuenta esta caída óhmica, el valor del par es:

$$C' = K \times CM \times I_2,$$

y dividiendo estas dos igualdades se tiene:

$$\frac{C}{C'} = \frac{EM}{CM}; \quad \text{de donde:} \quad C' = C \times \frac{CM}{EM}.$$

Pero como C está medido por EN, y es igual a $K' \times EN$, resulta:

$$C' = K' \times \frac{EN}{EM} \times CM.$$

Trazando CP paralela a EN, se tiene:

$$\frac{EN}{EM} = \frac{CP}{CM};$$

de donde:

$$CP = \frac{EN}{EM} \times CM,$$

o sea:

$$C' = K' \times CP.$$

Por consiguiente, el par motor desarrollado en el rotor es proporcional a CP, y según lo que hemos dicho, el par útil en la polea es proporcional a CP_1.

Un poco más adelante (pág. 310) veremos la manera de trazar prácticamente el círculo FCM.

b) *Potencia útil.* — Hemos visto que el par desarrollado en el rotor por el campo resultante F_2 es C, medido por la longitud CP; si el rotor girase con velocidad constante igual a ω, que es la pulsación de la tensión primaria, la potencia producida por este rotor sería $C\omega$, y por lo tanto sería proporcional a CP. Pero la velocidad del rotor disminuye con la carga y se reduce a $\omega' < \omega$; esta disminución de velocidad está determinada por la necesidad de tener una corriente I_2 en el secundario que desarrolle por su acción sobre el campo resultante un par que equilibre al par resistente. La disminución de velocidad debe ser tanto más grande, para un mismo par resistente, cuanto mayor sea la resistencia óhmica del rotor, comprendiéndose fácilmente que si esta resistencia es despreciable, la f. e. m. necesaria para producir una corriente I_2 sufi-

ciente sería muy pequeña, y por lo tanto la diferencia de velocidad $\omega - \omega'$ también sería pequeña. De aquí se deduce que la potencia es menor que $C\omega$ por ser la velocidad del rotor más pequeña que ω y que esta diferencia entre la potencia real y $C\omega$ es debida a la resistencia óhmica del secundario.

Se puede expresar este efecto de la resistencia óhmica del secundario diciendo que todo sucede como si permaneciera la velocidad independiente de la carga, y el par disminuyera con la carga a causa de la caída óhmica en el secundario. La disminución del par puede atribuirse a una disminución del flujo en el secundario y puede suponerse que el valor de esta disminución de flujo es proporcional a la caída óhmica R_2I_2, y por

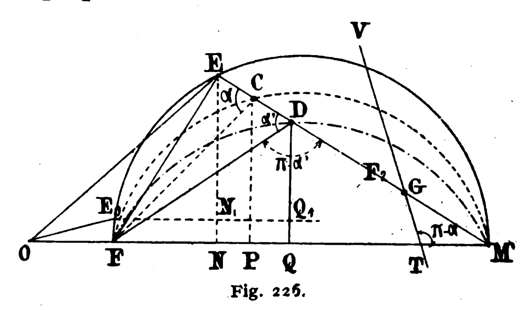


Fig. 226.

consiguiente a la corriente I_2. Partiendo del gráfico anterior, representemos la disminución del flujo F_2 por la longitud CD (fig. 226); el par ficticio de que hemos hablado está entonces medido por la longitud DQ, y como es independiente de la velocidad, puede medir a su vez la potencia. La recta DQ corta a la paralela a OM trazada por E_0 en el punto Q_1; la longitud QQ_1 mide la potencia perdida por frotamiento, por histeresis y por corrientes de Foucault, de modo que la potencia útil en la polea del motor está medida por el segmento DQ_1.

Uniendo F con D, y llamando α' al ángulo FDE, se tiene:

$$FE = ED \operatorname{tg} \alpha'; \qquad \operatorname{tg} \alpha' = \frac{FE}{ED}.$$

Ahora bien, según hemos dicho, tanto EF como ED son proporcionales a I_2, por lo cual la relación $\frac{FE}{ED}$ es constante así como el ángulo α', y es evidente que el punto D se encontrará sobre el arco de círculo que pasa por F y M, y es capaz de un ángulo $\pi - \alpha'$.

c) *Rendimiento.* — La potencia útil W_u es producida por un par de valor determinado por la longitud DQ_1 que actuaría sobre el rotor si éste girase con una velocidad ω igual a la pulsación de la corriente primaria; por lo tanto, se tiene:

$$W_u = DQ_1 \times \omega.$$

Por otra parte, hemos visto en la página 303 que el par desarrollado en el rotor es proporcional a EN, luego la potencia W comunicada al rotor es:

$$W = EN \times \omega.$$

Y por consiguiente, el rendimiento será:

$$\rho = \frac{W_u}{W} = \frac{DQ_1}{EN}.$$

d) *Resbalamiento.* — El flujo F_2 resultante en el secundario gira con la velocidad ω; el circuito secundario gira en el mismo sentido con la velocidad ω', luego la velocidad relativa del flujo a través de este circuito es $\omega - \omega'$ y da origen a una f. e. m. E_2 tal que se verifica:

$$E_2 = K \times F_2(\omega - \omega');$$

y llamando R_2 a la resistencia de este circuito, la corriente que en éste se produce será:

$$I_2 = \frac{K \cdot F_2(\omega - \omega')}{R_2};$$

de donde:

$$\omega - \omega' = \frac{R_2 I_2}{K \cdot F_2}.$$

El resbalamiento tiene por valor:

$$\frac{\omega - \omega'}{\omega}, \quad \text{o sea:} \quad g = \frac{R_2 I_2}{K \cdot F_2 \omega}.$$

El flujo resultante por el efecto de la caída óhmica en el primario está medido por CM, é I_2 por FE, teniéndose en consecuencia:

$$g = \frac{R_2 \cdot FE}{K' \cdot CM \cdot \omega}.$$

Pero R_2, ω y K' son constantes, luego el resbalamiento es proporcional a $\frac{FE}{CM}$, y puesto que FE es igual a FC sen α, y α es constante, resulta que también es proporcional a $\frac{FC}{CM}$ (fig. 227).

Por un punto cualquiera T de OM se traza una recta TV que forme con OM un ángulo $\beta = \pi - \alpha$, es decir, igual a FCM, recta que cortará a EM en G, y por ser semejantes los dos triángulos FCM y TGM resulta:

$$\frac{TG}{FC} = \frac{TM}{CM}, \quad \text{o sea:} \quad \frac{FC}{CM} = \frac{TG}{TM}.$$

Por consiguiente, el resbalamiento es proporcional a $\frac{TG}{TM}$ y puede definirse diciendo que:

$$g = a \times \frac{TG}{TM}.$$

Para determinar el factor de proporcionalidad a, consideremos el caso en que el rotor esté sujeto y en cortocircuito: la corriente en el estator está medida por OE_c; la recta E_cM corta al círculo FCM en el punto S.

Para encontrar el resbalamiento se traza por T una

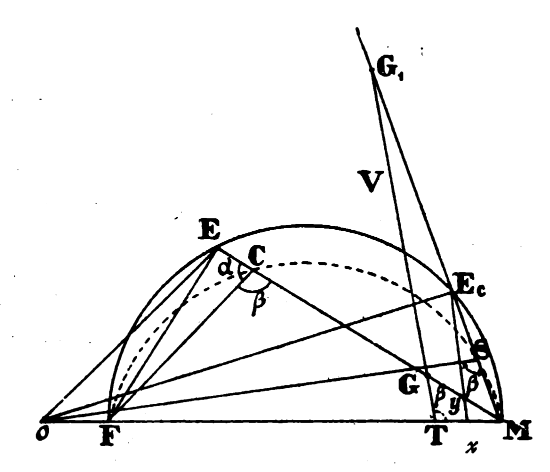


Fig. 227.

recta que forme con OM un ángulo igual al FSM, que es igual al FCM; esta recta se confundirá con TV, que corta a E_cM en G_1, y el resbalamiento tendrá por valor:

$$g_1 = a \times \frac{TG_1}{TM}.$$

Pero como el rotor no gira, $\omega' = 0$ y $g_1 = \frac{\omega}{\omega} = 1$; luego:

$$1 = a \times \frac{TG_1}{TM}; \quad \text{de donde} \quad a = \frac{TM}{TG_1}.$$

Cuando la corriente primaria es I_1, medida por DE, el resbalamiento es:

$$g = a \times \frac{TG}{TM} = \frac{TM}{TG_1} \times \frac{TG}{TM} = \frac{TG}{TG_1}.$$

Tracemos por E_c una paralela a TV, que cortará a OM en x y a EM en y, viéndose que se verifica la siguiente proporción:

$$\frac{TG}{TG_1} = \frac{xy}{xE_c}, \quad \text{o sea:} \quad g = \frac{xy}{xE_c}.$$

Cualquiera que sea la carga, la recta xE_c no cambia, por lo cual basta medir làs longitudes tales como xy tomando como unidad xE_c para tener el resbalamiento correspondiente a todas las cargas.

Construcción de los círculos FCM *y* FDM. — Para construir estos círculos, basta determinar experimentalmente un punto de cada uno de ellos.

1.º *Círculo* FDM. — Busquemos el punto D correspondiente al caso en que el rotor cerrado en cortocir-

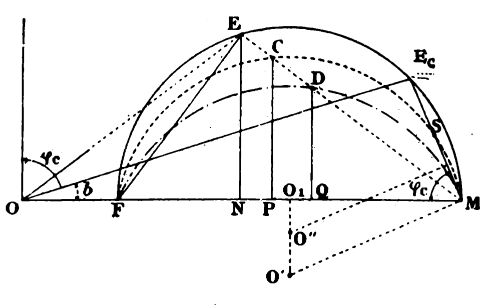


Fig. 228.

cuito está parado: la potencia útil es nula, y el punto D se confunde con el M.

Anteriormente hemos encontrado la corriente primaria I_c en este caso, que está representada por OE_c, re-

sultando que la recta ME_c no corta al círculo FDM más que en el punto M, es decir, que es tangente a este círculo en M. De aquí se deduce la siguiente construcción: se traza OE_c, dada en magnitud y dirección por la prueba en cortocircuito, y se une M con E_c; por M se traza la perpendicular a ME_c, que corta a la perpendicular levantada por el punto medio de FM en O', que es el centro del círculo buscado.

2.º *Círculo* FCM. — Determinemos el punto S de este círculo que se encuentra sobre la recta ME_c, para lo cual observemos que el punto S no es más que una posición particular del punto C determinado sobre la recta ME de modo que unido a O dé una recta de longitud OE igual a una corriente cualquiera I_1.

Se tiene:

$$CE = ME - MC \quad \text{y} \quad CD = MC - MD;$$

de donde:

$$\frac{CE}{CD} = \frac{ME - MC}{MC - MD}.$$

o sea:

$$\frac{CE}{CD} = \frac{(ME - MC)\operatorname{sen} FME}{(MC - MD)\operatorname{sen} FME} = \frac{ME \operatorname{sen} FME - MC \operatorname{sen} FME}{MC \operatorname{sen} FME - MD \operatorname{sen} FME}$$

es decir:

$$\frac{CE}{CD} = \frac{NE - PC}{PC - QD}.$$

Ahora bien, tomando una escala conveniente, NE mide la potencia comunicada al motor, y PC lo que queda de esta potencia después de restadas las pérdidas Joule en el estator, de modo que $NE - PC$ mide estas pérdidas $3\,R_1I_1^2$; QD mide lo que queda de esta potencia después de las pérdidas Joule en el rotor,

luego $PC - QD$ mide estas pérdidas, es decir, $3 R_2 I_2^2$. Por consiguiente, se tiene:

$$\frac{CE}{CD} = \frac{R_1 I_1^2}{R_2 I_2^2}.$$

Esta relación se verifica cualquiera que sea la corriente I_1, luego será cierta también para el caso en que esta corriente sea la de cortocircuito I_c medida por OE_c, es decir que:

$$\frac{E_c S}{SM} = \frac{R_1 I_c^2}{R_2 I'^2_2};$$

donde I'_2 es la corriente en el rotor cuando está parado y en cortocircuito; de esta relación se deduce fácilmente la posición del punto S.

Una vez obtenido el punto S, se traza una perpendicular a MS en su punto medio, perpendicular que cortará a la levantada a FM en su punto medio, en un punto O'' que es el centro del círculo FCM.

Con los tres círculos trazados FEM, FCM y FDM se puede determinar para todos los valores de la corriente primaria el par motor útil, la potencia sobre la polea, el rendimiento y el resbalamiento. Para trazar estos círculos basta: 1.º, hacer una prueba en circuito abierto, con lo cual se tiene I_0 y φ_0; 2.º, hacer una prueba en cortocircuito, estando el rotor sujeto, con lo cual se tiene I_c, φ_c e I'_2 correspondiente a I_c; 3.º, medir las resistencias del rotor y del estator R_1 y R_2.

Observación. — El trazado de este diagrama circular presenta una dificultad considerable, que consiste en la necesidad de alimentar el estator a tensión igual a la primaria normal U_1 cuando el circuito está cerrado en cortocircuito, con lo cual se tiene en los devanados corrientes de intensidad demasiado elevada y peligrosa.

Se puede *orillar* esta dificultad siguiendo uno de estos dos medios:

1.º Se alimenta el primario con una tensión reducida pequeña, elevando esta tensión hasta que se obtengan las corrientes máximas que puedan soportar los devanados. Sea I'_c la corriente en el secundario, siendo la tensión en el primario igual a U_1; se admite que hay proporcionalidad entre la corriente secundaria y la tensión primaria, de modo que para la tensión primaria normal U_1 la corriente en el secundario, parado y en cortocircuito, será:

$$I_c = I'_c \times \frac{U_1}{U'_1}.$$

2.º Pero como esta proporcionalidad no es del todo exacta, la curva que da la corriente I_c en función de la tensión primaria no es una línea recta. Para salvar este inconveniente se alimenta el primario con una serie de tensiones cada vez mayores, anotando para

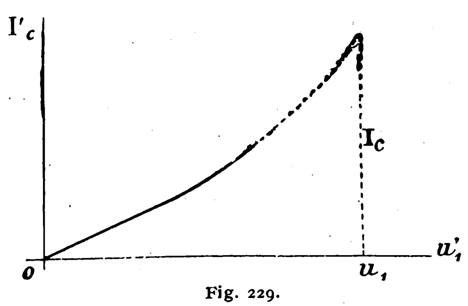


Fig. 229.

cada valor de la tensión la corriente correspondiente I'_c y se construye una curva que tenga por abscisas los valores de U_1 y por ordenadas los valores correspondientes de I'_c; se prolonga esta curva, siguiendo la forma indicada por la parte así construída, hasta llegar al punto cuya abscisa es el valor de la tensión normal. con lo cual se obtiene la corriente I_c (fig. 229).

Determinación de los factores de proporcionalidad. — Los círculos *FEM*, *FDM*, *FCM* (fig. 226), que designaremos respectivamente por *I*, *II* y *III*, permiten determinar fácilmente las magnitudes características del motor para una carga correspondiente a una corriente dada I_1 en el estator. Desde *O* como centro, y con un radio cuya longitud mida I_1 en la escala adoptada para medir los amperes, se describe un arco de círculo que cortará al círculo *I* en *E*; se une *E* con *M*, y esta recta *EM* corta a los círculos *II* y *III* en *D* y *C* respectivamente; obtenidos estos puntos y refiriéndonos a la figura 226, se tiene que:

EN mide la componente wattada o energética de la corriente primaria y la potencia absorbida por el motor;
DQ_1 mide la potencia recogida sobre la polea del motor;
$\frac{DQ_1}{EN}$ es el rendimiento;
CP_1 (fig. 225) mide el par útil en la polea y
$\frac{xy}{xE_c}$ es el resbalamiento (fig. 227).

Ahora sólo quedan por determinar los factores de proporcionalidad, es decir, las escalas.

Componente wattada I_{1w}, *de la corriente primaria.* — Es igual *EN* medida con la escala arbitrariamente escogida para las corrientes.

Potencia. — Se conoce la tensión primaria aplicada U_1 y la componente wattada I_{1w} de la corriente, luego la potencia comunicada al motor, $U_1 I_{1w}\sqrt{3}$, estará medida por *EN*, cuya longitud se mide en milímetros sobre el diagrama, deduciéndose la escala de las potencias, es decir, el número de watts correspondiente a cada milímetro.

La longitud DQ_1 medida en milímetros dará, en esta escala, la potencia recogida en la polea.

Par. — Hemos visto (pág. 296) que si no hubiera ninguna pérdida de potencia, el par sobre la polea tendría un valor C tal que $C\omega$ sería igual a $\sqrt{3} \cdot U_1 I_{1w}$. Siendo C conocido, puesto que se conoce la pulsación ω de la corriente primaria, se expresará su valor en joules-par, o en kilográmetros. Y como este par está medido por EN se deducirá en joules-par o en kilográmetros por milímetro la escala de los pares. La longitud CP_1 medida en esta escala dará el par útil sobre la polea.

OBSERVACIÓN. — Conociendo el resbalamiento g se puede calcular la velocidad del motor para la carga dada, puesto que se ha visto que:

$$g = \frac{\omega - \omega'}{\omega}, \quad \text{de donde:} \quad \omega' = \omega - g\omega = \omega(1 - g).$$

Si el campo giratorio creado por el estator tiene $2\,p$ polos, se tiene: $\omega = \frac{\omega_1}{p}$ (siendo ω_1 la pulsación de la corriente); por lo tanto resulta:

$$\omega' = \frac{\omega_1}{p}(1 - g),$$

y el motor girará a razón de N' vueltas por minuto, estando N' dado por la relación:

$$\omega' = \frac{2\pi N'}{60}, \quad \text{de donde:} \quad N' = \frac{60 \times \omega'}{2\pi} = \frac{60\,\omega_1(1 - g)}{2\,\pi p}.$$

EJEMPLO

Prueba de un motor asincrónico trifásico

Potencia: 10 caballos. — Devanados, en estrella. — Tensión de alimentación, compuesta: 500 volts, 25 períodos.

1.º *Medida de las resistencias de los devanados.* — Estator: suma de las resistencias de las tres ramas; $3\ R_1 = 1{,}521$ ohms. Rotor: suma de las resistencias de las tres ramas; $3\ R_2 = 0{,}139$ ohms.

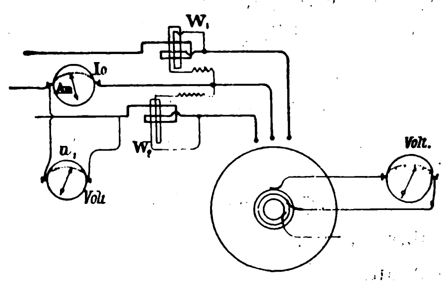


Fig. 230.

2.º *Prueba en vacío.* — Tensión aplicada (fig. 230) en el primario: $U_1 = 500$ volts, 25 períodos.

Corriente en el primario $I_0 = 4{,}8$ amperes:

Potencia: wattímetro W_1, 880 vatts; wattímetro W_2, 380 watts.

El sentido de las desviaciones de las agujas es tal

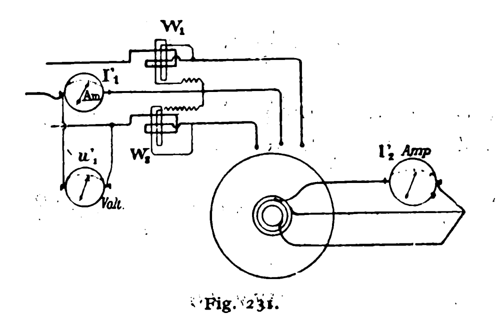


Fig. 231.

que las indicaciones deben restarse; luego la potencia absorbida por el primario, en vacío es:

$$W_0 = 880 - 380 = 500 \text{ watts.}$$

Tensión en los bornes del secundario: 83 volts.

3.° *Prueba en cortocircuito* (fig. 231). — Tensión primaria aplicada, $u'_1 = 100$ volts; corriente en el primario $I'_1 = 12$ amperes; corriente en el secundario $I'_2 = 73$ amperes.

Potencia: wattímetro W_1, 1 020 watts; wattímetro W_2, 60 watts.

Las indicaciones de los dos wattímetros deben restarse, por lo cual la potencia tomada por el primario es:

$$W_c = 1020 - 60 = 960 \text{ watts.}$$

Trazado del diagrama. — La corriente I_0 es de 4,8 amperes.

1.° Determinación del cos φ_0. — Potencia absorbida por cada uno de los circuitos primarios:

$$\frac{W_0}{3} = \frac{500}{3} = 166 \text{ watts.}$$

Tensión estrellada entre los extremos de cada uno de estos circuitos: $\frac{500}{\sqrt{3}}$ volts; luego:

$$\cos \varphi_0 = \frac{166}{\frac{500}{\sqrt{2}} \times 4{,}8} = 0{,}12.$$

2.° Determinación de cos φ_c. La tensión U'_1 es igual a 100 volts, $I'_1 = 12$ amperes, $W'_1 = 960$ watts.

Potencia tomada por cada fase: $\frac{960}{3} = 320$ watts.

Tensión entre los extremos de cada fase: $\frac{100}{\sqrt{3}}$; por lo tanto:

$$\cos \varphi_c = \frac{320}{\frac{100}{\sqrt{3}} \times 12} \doteq 0{,}461.$$

Admitiendo la proporcionalidad entre la corriente y la tensión, se tiene:

Corriente en el secundario cuando el primario está alimentado a 500 volts:

$$12 \times \frac{500}{100} = 60 \text{ amperes.}$$

El trazado del diagrama deducido de estos resultados es el indicado en la figura 232, donde todas las

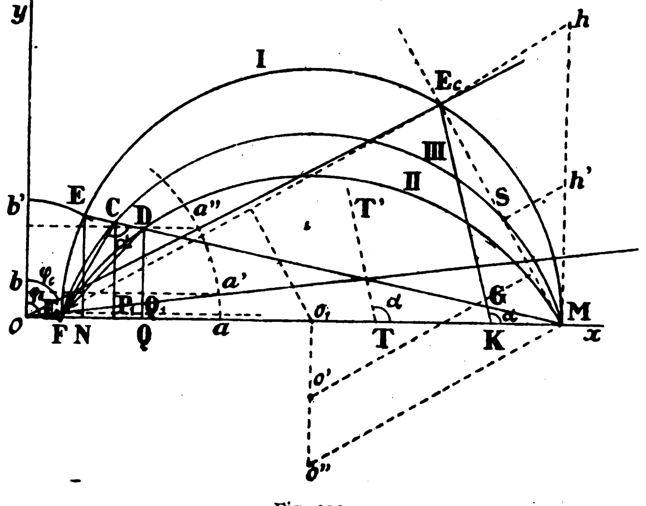


Fig. 232.

escalas están reducidas a la mitad, por lo cual hay que multiplicar por 2 las longitudes medidas en el mismo para obtener los valores hallados.

Trazado de I_0. — $I_0 = 4{,}8$ amperes, y cos $\varphi_0 = 0{,}12$.

Se traza un círculo de radio $oa = 50$ mm. y se toma $ob = 50 \times 0{,}12 = 6$ mm., obteniéndose el punto a'. Sobre oa' se toma $oE_0 = 4{,}8$ amperes en la escala adoptada para los amperes.

Trazado de I_c. — $I_c = 60$ amperes, y cos $\varphi_c = 0{,}46$.

Se toma $ob' = 50 \times 0{,}46 = 23$ mm. y se obtiene el punto a'' sobre el círculo de radio oa. Sobre oa'' se toma $oE_c = 60$ amperes, en la escala correspondiente.

Trazado del círculo I. — Se une E_c con E_0 y se levanta la perpendicular a la recta resultante E_cE_0 en su punto medio, perpendicular que cortará en o_1 a la recta oa. Desde o_1 como centro, con oE_c por radio, se traza una circunferencia que pasará por E_0 y que cortará a oa en M.

Trazado del círculo II. — Por M se traza la perpendicular a ME, que cortará a la perpendicular a oM trazada por o_1 en el punto o', y se traza el círculo de centro o'' y radio $''oM$.

Trazado del círculo III. — Se determina sobre ME_c un punto S tal que:

$$\frac{E_cS}{SM} = \frac{R_1I'^2_1}{R_1I'^2_2}.$$

Se ha encontrado para I'_1, el valor 12 amperes, y para la corriente correspondiente en el secundario I'_2 el valor de 73 amperes, por lo tanto:

$$3\ R_1I'^2_1 = 1{,}521 \times 12^2 = 219 \text{ watts,}$$
$$3\ R_2I'^2_2 = 0{,}139 \times 73^2 = 741 \text{ watts}$$

luego:

$$\frac{R_1I'^2_1}{R_2I'^2_2} = \frac{219}{741}, \quad \text{y} \quad \frac{E_cS}{SM} = \frac{219}{741}.$$

Sobre una recta cualquiera trazada por M, se toma Mh igual a $219 + 741 = 960$ watts en la escala arbitraria de 0,04 mm. por watt, por ejemplo, y en la misma escala se toma $Mh' = 741$ watts; se une E_c con h, y la paralela a E_ch trazada por h', corta a ME_c en S. La perpendicular levantada a MS en su punto medio corta a o_1o'' en o', que es el centro del círculo III descrito con $o'M$ como radio.

Una vez trazados estos círculos supongamos que el motor funcionando bajo una tensión de 500 volts, absorba una corriente de 15 amperes.

Desde el punto *o* como centro y con un radio de 15 amperes, medido en la escala de los amperes, se traza un arco de círculo, que cortará al círculo I en el punto E, y se une E con M.

La componente wattada de la corriente, que es NE, medida en la escala correspondiente, es de 13,25 amperes, correspondiéndole una potencia absorbida por el motor igual a:

$$W = \sqrt{3} \times 500 \times 13{,}25 = 11\,474{,}5 \text{ watts.}$$

Como EN tiene una longitud de 26,5 mm., todas las rectas tales como EN medirán la potencia tomada por el motor, en la escala de:

$$\frac{11\,474{,}5}{26{,}5} = 433 \text{ watts por milímetro.}$$

La potencia recogida en la polea está medida por DQ_1, que tiene por longitud 22 mm. correspondientes a una potencia de:

$$22 \times 433 = 9\,526 \text{ watts,}$$

o sea:

$$\frac{9\,526}{736} = 13 \text{ caballos.}$$

Rendimiento. — Está medido por la relación $\frac{DQ_1}{EN}$; por consiguiente:

$$\rho = \frac{22}{26{,}5} = 0{,}83.$$

Par motor. — El par desarrollado en el motor es C, y cumple con la siguiente condición:

$$C \times 2\pi \times 25 = 11\,474{,}5;$$

de donde:

$$C = \frac{11\,474{,}5}{2 \times 3{,}14 \times 25} = 73{,}09 \text{ joules-par.}$$

La longitud EN de 26,5 mm. mide el par desarrollado en el rotor, en la escala de $\frac{73{,}09}{26{,}5}$, o sea de 2,76 joules por milímetro.

El par útil en la polea está medido por CP_1 cuya longitud es de 23 milímetros: luego tiene un valor C' tal que:

$$C' = 2{,}76 \times 23 = 63{,}48 \text{ joules-par,}$$

o sea:

$$\frac{63{,}48}{9{,}81} = 6{,}8 \text{ kilográmetros.}$$

Resbalamiento. — Por un punto cualquiera T se traza una recta TT' que forme con oM un ángulo MTT' igual a α (siendo $\alpha = FCM$), y por E_c se traza una paralela a TT' que cortará a oM en K, y a EM en G. El resbalamiento es:

$$g = \frac{KG}{E_c K}.$$

La longitud de $E_c K$ medida en el diagrama es de 57 milímetros, y la de GK de 4 milímetros; por consiguiente:

$$g = \frac{4}{57} = 0{,}07.$$

Ensayo directo. — Se puede hacer una prueba directa, si es posible producir y absorber la potencia necesaria para la carga del motor. Para ello se carga el motor mediante un freno; se disponen en los conductores que lo unen con el generador dos wattímetros y un amperímetro, y se aprieta el freno de modo que

se obtengan diferentes cargas. Manteniéndose constante la tensión U, se anota:

1.° el peso P, en Kg., que equilibra el freno;

2.° las indicaciones W_1 y W_2 de los dos wattímetros;

3.° la intensidad de la corriente en el primario;

4.° la velocidad, N vueltas por minuto.

De estas lecturas se deduce, para cada valor de la carga: la corriente primaria I_1; el par motor en la polea, Pl kilográmetros, siendo l metros la longitud del brazo de palanca del freno; la potencia absorbida por el motor $W = W_1 + W_2$; el rendimiento ρ:

$$\rho = \frac{Pl \times 9{,}81 \times \frac{2\pi N}{60}}{W};$$

y el defasaje φ de la corriente sobre la tensión (pág. 230):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1}.$$

Con estos valores, determinados para distintas cargas, se pueden trazar las características del motor,

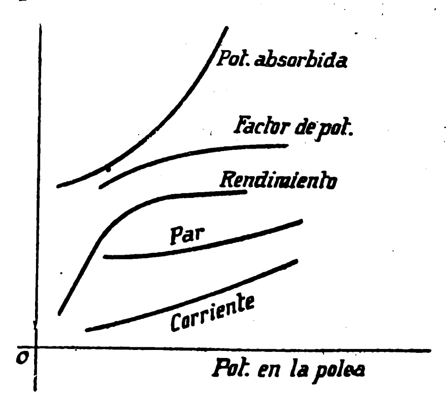


Fig. 233.

es decir, las curvas que representan, en función de la potencia útil en la polea, las siguientes magnitudes:

la corriente absorbida, el par motor, la potencia absorbida, el rendimiento, el defasaje o el factor de potencia cos φ. Estas curvas tienen las formas indicadas en la figura 233.

El valor del resbalamiento se puede determinar directamente del modo que sigue: se fija sobre el extremo del árbol del motor un disco de cartón dividido en un número de sectores alternativamente negros y blancos igual al número de polos (figura 234). Este disco se ilumina con un arco voltaico, alimentado por una de las fases del generador unido al motor. Dejando a oscuras la habitación donde se haga la prueba, y procurando que la luz no dé directamente en los ojos, los sectores parecerá que giran en sentido inverso al sentido de rotación del motor. Se cuenta el número de vueltas n que da uno de los sectores en T segundos, y el resbalamiento será:

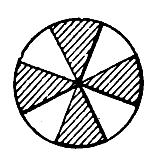


Fig. 234.

$$g = \frac{n}{2\,Tf},$$

donde f es la frecuencia de la corriente primaria.

Prueba de un grupo motor trifásico y dinamo

Sea un motor de 220 volts, 165 amperes y 730 vueltas por minuto, con el estator en triángulo; y supongamos que la dinamo es compound, de 250 volts y 180 amperes.

La resistencia medida entre los dos bornes del motor es 0,036 ohms, luego la resistencia de cada uno de los tres devanados será de $\frac{0{,}036 \times 3}{2} = 0{,}054$ ohms.

Ensayos del motor. a) *De vacío, sin mover la generatriz.* — Aplicando tensiones variables entre los bornes del motor, se mide la corriente en las líneas y la potencia absorbida; manteniendo la velocidad a 730 vueltas, se han obtenido los siguientes resultados:

Tensión aplicada	Corriente	Potencia absorbida
50 volts	15,0 amperes	875 watts
70 »	17,0 »	900 »
90 »	20,0 »	950 »
110 »	23,5 »	1 000 »
130 »	27,5 »	1 100 »
150 »	31,5 »	1 175 »
170 »	35,5 »	1 300 »
190 »	40,0 »	1 450 »
220 »	**47,5** »	**1700** »
240 »	52,0 »	1 900 »
260 »	57,5 »	2 125 »

b) *La dinamo es movida, pero de vacío:*

Tensión aplicada	Corriente	Potencia absorbida
50 volts	20,5 amperes	1 350 watts
70 »	20,0 »	1 425 »
90 »	22,5 »	1 500 »
110 »	26,0 »	1 600 »
130 »	30,0 »	1 675 »
150 »	33,5 »	1 775 »
170 »	37,5 »	1 900 »
190 »	42,0 »	2 050 »
220 »	**49,5** »	**2300** »
240 »	54,0 »	2 475 »
260 »	60,0 »	2 675 »

Estos resultados están representados gráficamente en las figuras 235 y 236.

La diferencia entre las ordenadas de las curvas I y II de la figura 236, da la potencia absorbida por los

rozamientos y la ventilación en la generatriz. Se ve que a la velocidad de 730 vueltas por minuto, estas pérdidas son de 600 watts.

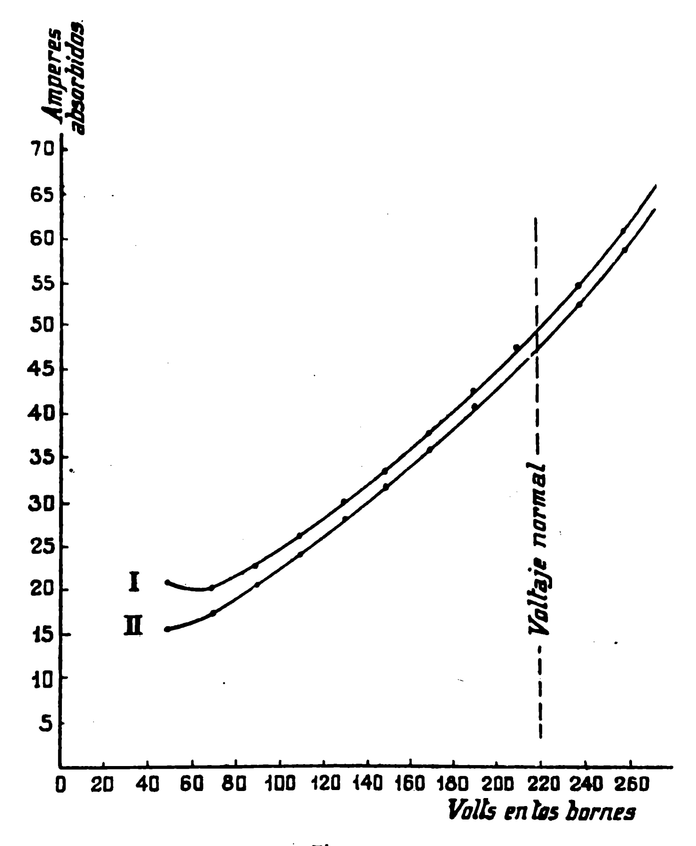


Fig. 235.

I. — Amperes absorbidos, moviendo el motor a la dinamo.
II. — Amperes absorbidos, marchando el motor en vacío.

Característica en vacío de la dinamo. — Al cabo de 8 horas de marcha (ensayos de caldeo) la característica es la representada en la figura 238.

Rendimiento del motor. — Condiciones de funcionamiento, 154 amperes; potencia absorbida, 52 120 watts; resbalamiento, 2,13.

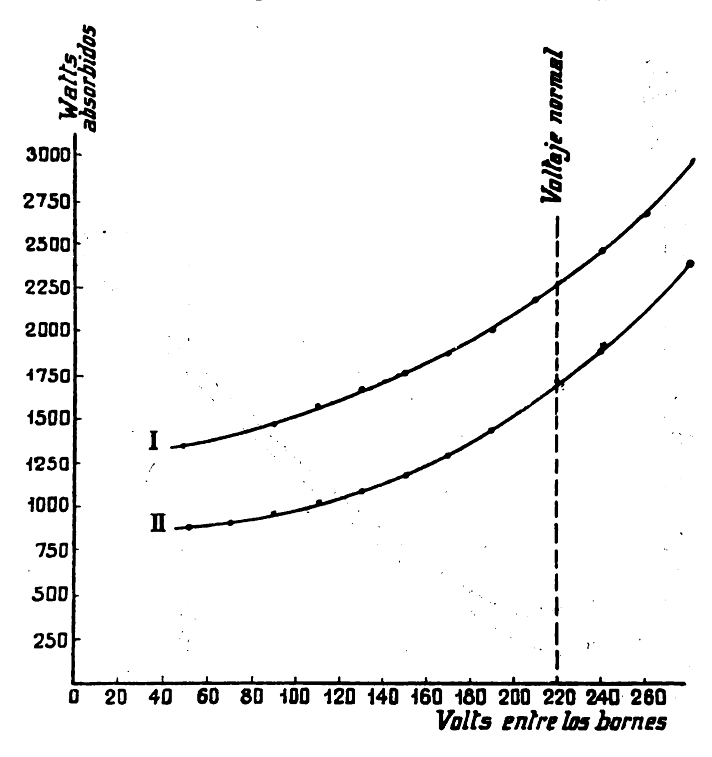


Fig. 236.

I. — Watts absorbidos, moviendo el motor a la dinamo.
II. — Watts absorbidos, marchando el motor en vacío.

Cálculo de las pérdidas, en este caso:

potencia en vacío, sin mover la dinamo: 1 700 watts;
corriente en vacío, sin mover la dinamo: 47,5 amperes.

Por consiguiente:

Pérdidas por efecto Joule, en vacío:

$$47{,}5^2 \times 0{,}054 = 122 \text{ watts},$$

y por lo tanto, las pérdidas mecánicas y magnéticas serán:

$$1\,700 - 122 = 1\,578 \text{ watts.}$$

Pérdidas, en carga, por efecto Joule, siendo la corriente de 154 amperes:

$$154^2 \times 0{,}054 = 1\,280 \text{ watts.}$$

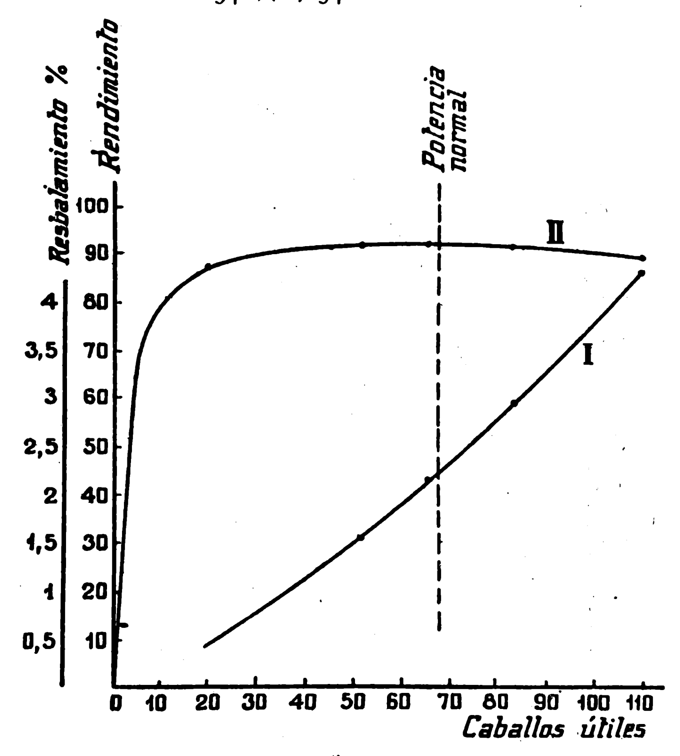


Fig. 237.

I. — Resbalamientos. II. — Rendimientos.

Por lo tanto, se obtiene como pérdidas totales:

$$1\,578 + 1\,280 = 2\,858 \text{ watts.}$$

Potencia comunicada al rotor:

$$52\,120 - 2\,858 = 49\,262 \text{ watts.}$$

En su virtud, la pérdida debida al resbalamiento vale:

$$\frac{49\,262 \times 2{,}13}{100} = 1\,049 \text{ watts.}$$

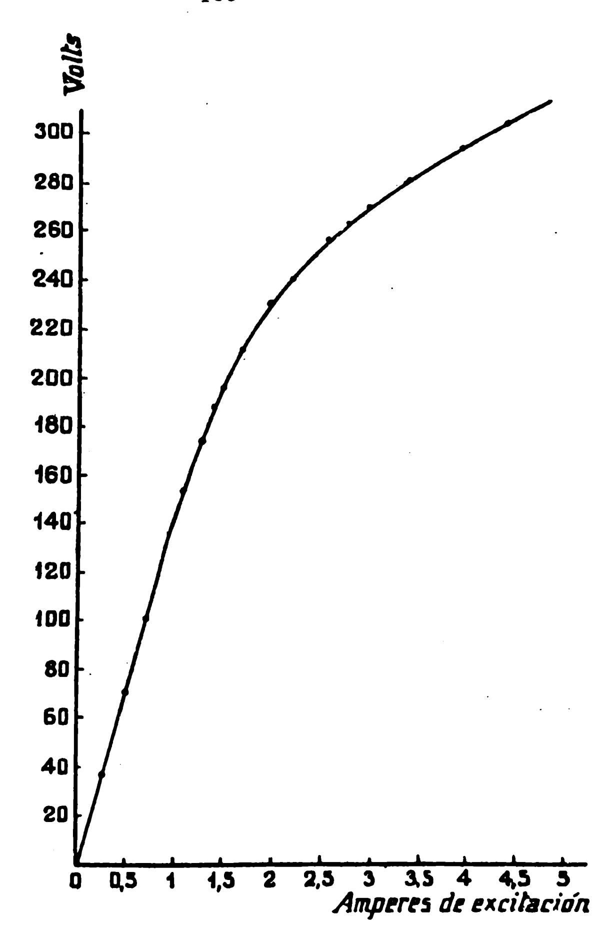


Fig. 238.
Característica de la dinamo en vacío.

Se obtiene, por consiguiente, como potencia útil:

$$49\,262 - 1\,049 = 48\,213 \text{ watts.}$$

Finalmente, el rendimiento alcanzará un valor de:

$$\frac{48213}{52120} = 92,5\,\%.$$

Mediante este cálculo, efectuado para los distintos valores de la potencia tomada por el motor, se ha podido trazar la curva II de la figura 237.

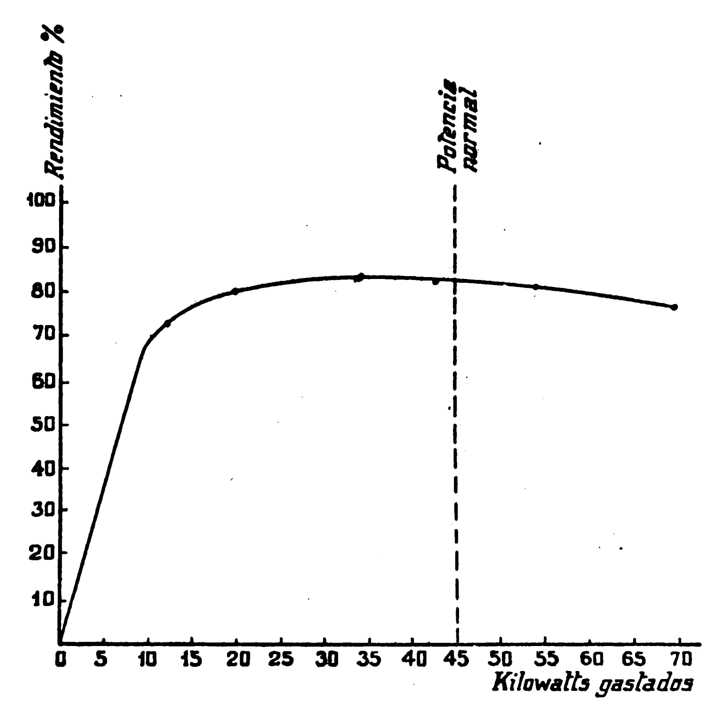


Fig. 239.
Rendimiento global del grupo.

La potencia útil es $\frac{W'}{736} \times$ rendimiento del motor, o sea, en este caso:

$$\frac{52120}{736} \times 0,925 = 65 \text{ HP}.$$

Rendimiento de la generatriz: $\frac{82,4}{92,5} = 89\ \%$.

Ensayo en carga. — Se hace pasar la corriente de la dinamo por una resistencia variable y se mide: la

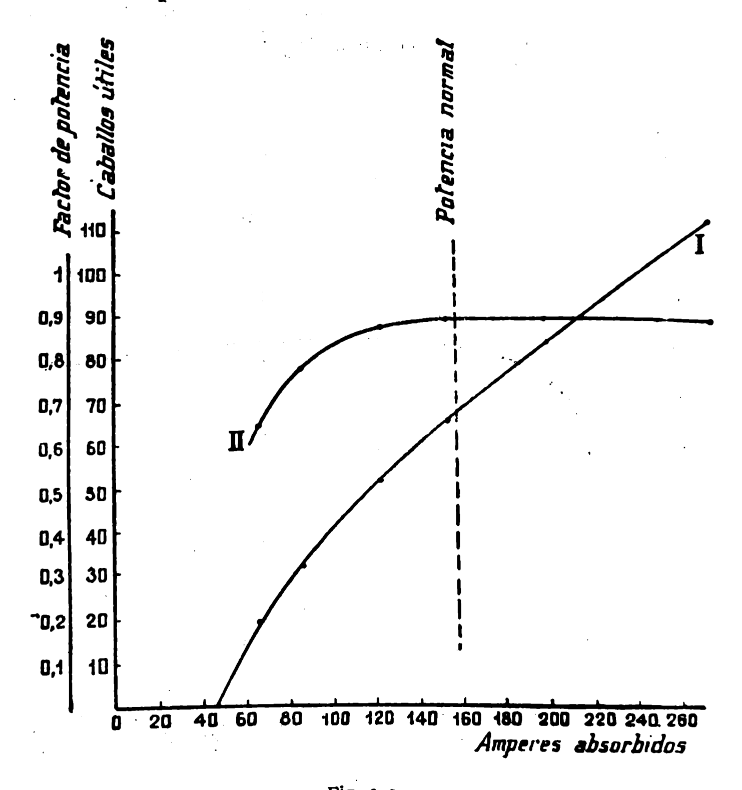


Fig. 240.

I. — Potencia útil en caballos. II. — Factor de potencia.

tensión entre las escobillas (que se mantiene igual a 252 volts), la corriente dada por la dinamo, la corriente en las líneas de alimentación del motor, la potencia absorbida por el motor, y el resbalamiento.

En la siguiente tabla se ven los resultados obtenidos:

Dinamo, $E = 252$ volts..

Corriente I	Potencia EI
46,5 amp.	11 720 watts
80 »	20 080 »
135 »	34 000 »
170 »	42 800 »
215 »	54 300 »
275 »	69 800 »

Motor $E' = 220$ volts

Corriente I'	Potencia W'	Factor de pot. $\cos \varphi = \frac{W'}{E'I'\sqrt{3}}$	Resbalamiento
66 amp.	16080 watts	0,64	0,38 %
85 »	25080 »	0,77	0,92 »
122 »	40 840 »	0,87	1,57 »
154 »	52 120 »	c,88	2,13 »
199,2 »	67 120 »	0,88	2,97 »
272,5 »	90 800 »	0,87	4,33 »

Rendimiento del grupo, $\rho = \frac{EI}{W'}$: 73,0 %; 80,2 »; 83,4 »; 82,4 »; 80,9 »; 76,8 »

Estos resultados están representados gráficamente en las figuras 239 y 240.

Caldeo

Temperaturas observadas al cabo de ocho horas de marcha, siendo la temperatura ambiente de 22°,5

Motor:	Temperaturas	Elevación de temperatura
Planchas exteriores	45°	22°,5
Ventilación	46°	23°,5
Devanado estator	47°	24°,5
Planchas del rotor	41°	18°,5
Cojinete	41°	18°,5

Generatriz:	Temperaturas	Elevación de temperatura
Colector	38°,6	16°,1
Parte posterior del inducido	42°	19°,5
Parte anterior del inducido	39°,6	17°,1
Planchas inducidas de atrás	43°	20°,5
Inductor de hilo fino	55°	32°,5
Polos suplementarios	53°	30°,5
Cojinete del lado del colector	35°,5	13°,0
Cojinete del medio	41°	18°,5

Prueba en recuperación de dos grupos, idénticos, de motor asincrónico y generatriz de corriente continua.— Para probar en la placa de pruebas grupos-motor asincrónico y generatriz de los cuales se hayan construído

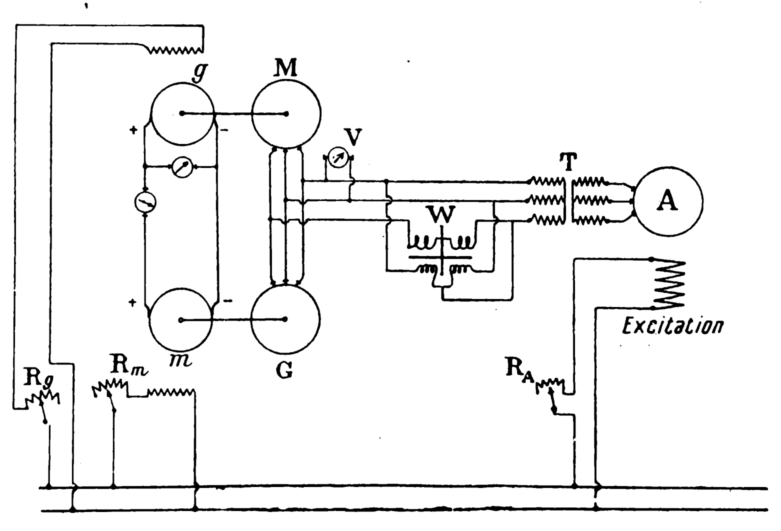


Fig. 241.

dos unidades idénticas, resulta muy cómodo montarlos en recuperación, como se indicó para las máquinas de corriente continua (método Hopkinson), página 165.

El montaje es el indicado en la figura 241. Las dos

máquinas asincrónicas M, G, se montan en oposición, alimentadas por el transformador I y el alternador A, cuya excitación se regula con el reostato R_A de modo que resulte la tensión para que han sido construídas.

Las máquinas de corriente continua se montan también en oposición, se regulan sus corrientes de excitación en los reostatos R_g y R_m de tal modo que una de ellas, la m funcione como motor, la otra g como generador, y que el motor m gire con una velocidad superior a $\frac{\omega}{p}$, siendo ω la frecuencia de la corriente que alimenta las máquinas asincrónicas y $2p$ su número de polos. La máquina asincrónica G, movida por m, funciona así como generatriz y devuelve la energía tomada por la máquina M girando como motor, al alternador A que solamente tiene que dar las pérdidas de energía en los dos grupos.

Se termina la regulación mediante los reostatos de campo de modo que se obtenga la corriente de régimen I en el circuito de las máquinas g y m, y la tensión u entre sus bornes, procediendo como se dijo para el montaje Hopkinson de las máquinas de corriente continua.

El wattímetro para fases equilibradas W da el valor de las pérdidas.

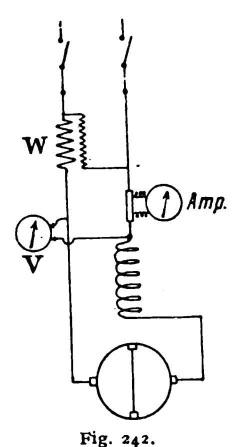


Fig. 242.

Prueba de un motor monofásico con colector. — Estas pruebas se hacen como para los motores de corriente continua; se alimentan bajo una tensión constante y se cargan con un freno. Se mide la corriente, la potencia absorbida, el par sobre la polea y la velocidad.

Para un motor Latour, con el montaje de la figura 242, se ha obtenido:

Tensión	Corriente	$U \times I$	Potencia absorbida	Cos φ
$u = 120$ v.	$I = 42$ a.	5040	$UI \cos \varphi = 4760$	0,94

Par en kilográmetros	Velocidad en vueltas por minuto	Potencia desarrollada	Rendimiento
$C = Pl = 4$	$V = 690$	$1027\ C \times V = 2830$	$\frac{2830}{4760} = 0{,}59$

Haciendo variar el par resistente con el freno, se pueden trazar las curvas características del motor [1].

EJERCICIOS

1.º **Comprobar la producción de campos giratorios por las corrientes polifásicas.** — Se puede conseguir este

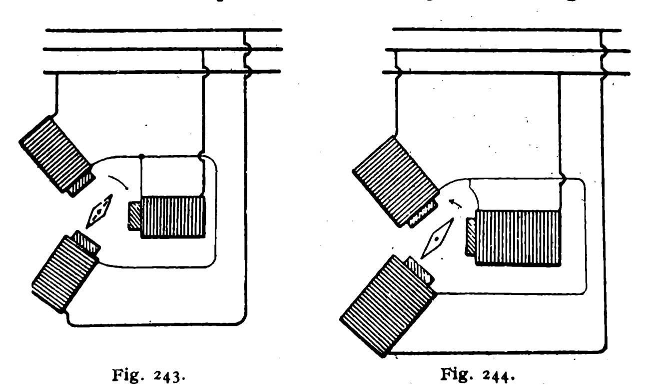


Fig. 243. Fig. 244.

objeto del sencillo modo siguiente: se disponen, a 120º unos de otros, tres carretes de autoinducción idénticos que se

[1] Para el montaje y funcionamiento de estos motores véase el tomo IV, INSTALACIONES INTERIORES.

alimentan con corrientes trifásicas después de haber montado los circuitos en estrella o en triángulo; una aguja imanada colocada sobre una varilla puntiaguda vertical, se mueve en el sentido del campo, patentizando así la existencia de este último (fig. 243).

2.º **Cambiar el sentido de rotación del campo.**—Cambiando las fases de dos carretes, la aguja toma un movimiento de rotación inverso al que tenía antes (fig. 244).

3.º **Producción de un campo giratorio con una corriente monofásica.** — Se alimenta un carrete sin hierro, y

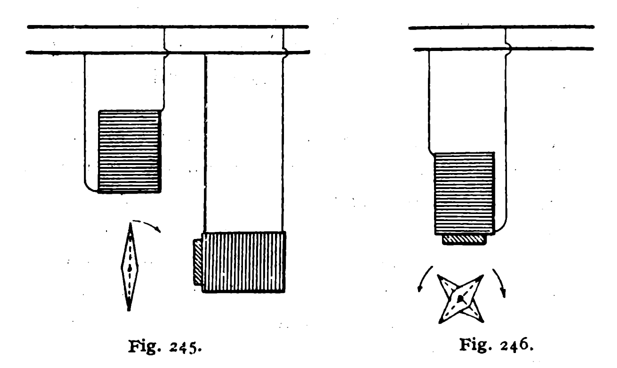


Fig. 245. Fig. 246.

otro con núcleo de hierro, estando colocados los ejes de estos dos carretes perpendicularmente entre sí, y se obtiene como antes una rotación de la aguja imanada (fig. 245).

4.º **Descomposición de un campo alterno, de dirección constante, en dos campos giratorios de sentidos inversos.** — Se alimenta un carrete con una corriente alterna y se disponen, frente al mismo, dos agujas imanadas; si se inicia el movimiento de estas agujas en sentido inverso una de otra, siguen girando en el sentido en que se ha empezado a moverlas (fig. 246).

5.º **Estudio de un motor sincrónico** (véase lo explicado en el tomo I, GENERALIDADES, pág. 510).

a) *Arranque.* — Se mueve el motor valiéndose de un motor auxiliar de corriente continua; cuando se han conseguido las condiciones de sincronismo, se cierra el interruptor que une el motor con la línea y se corta la corriente que alimenta el motor de corriente continua.

b) *Cambiar el sentido de rotación.*—Se cambia el sentido de rotación del campo estatórico, operando como en el ejercicio segundo.

c) *Punto crítico.* — Se cierra la máquina de corriente continua, montada con excitación independiente, sobre un reostato, con lo cual obra como un generador. Se disminuye poco a poco la resistencia del reostato, es decir, se aumenta la carga, alcanzándose un valor para el cual el motor queda fuera de fase, la corriente en el motor se eleva de pronto, y en este instante hay que cortar la corriente que alimenta al motor sincrónico.

Se vuelve a poner en marcha el motor con una carga menor en la máquina de corriente continua y se hace saltar bruscamente la correa que une el motor sincrónico con la máquina de corriente continua. La velocidad del motor se acelera, pasando del valor de la de sincronismo, y el motor queda fuera de fase; entonces hay que cortar inmediatamente la corriente que lo alimenta.

d) *Prueba de funcionamiento.* — Trazado de las curvas en V para varias cargas. Rendimiento.

6.º **Estudio de un motor asincrónico.** — Trazar las características del motor por medio del diagrama circular de Heyland. Comparar los resultados con los obtenidos directamente con el freno:

CAPÍTULO XIV

Defectos y accidentes en las máquinas de corriente alterna

I. — Alternadores

a) **La tensión en los bornes del alternador es nula.** — Causas: 1.ª No hay tensión en los bornes de la excitatriz (véase capítulo IX).

2.ª Rotura del circuito inductor o en el reostato de campo; la excitatriz desarrolla su tensión normal, pero no hay corriente en la excitación.

3.ª Cortocircuito en los conductores que llevan la corriente de excitación (entre las anillas, en los hilos de unión, o en los carretes inductores); la excitatriz de una corriente excesiva.

4.ª Rotura en el devanado inducido: el alternador no da entre sus bornes la tensión pequeña que produciría la imanación remanente.

b) **La tensión entre los bornes es demasiado pequeña.** — Causas: 1.ª Uno o varios carretes inducidos están en cortocircuito; el alternador produce un zumbido y algunas partes del inducido se calientan rápidamente.

2.ª Algunos carretes inducidos están mal conectados y están montados en oposición con los demás.

c) **Las tensiones entre las fases (alternador polifásico) no son iguales.** — Causas: rotura de un carrete

inducido. Alternador bifásico: corriente en una sola fase; alternador trifásico: los aparatos derivados sobre dos fases están montados en serie y sometidos a una tensión reducida.

d) **Calentamiento excesivo.** — En el circuito inductor; causa: cortocircuito en los carretes inductores. En el circuito inducido; causa: cortocircuito en los carretes inducidos, cortocircuito entre fases (alternador polifásico).

II. — Motores de inducción

a) **El motor no arranca.** — Causas: 1.ª No hay corriente en una de las fases: roturas en el estator.

2.ª Las corrientes en las fases son diferentes: rotura en una fase del estator o defecto de conexión de las fases.

3.ª Cortocircuito en el estator.

b) **Par motor pequeño, el motor se sale de fase con facilidad.** — Causas: 1.ª Tensión de alimentación demasiado pequeña.

2.ª Conexiones equivocadas (en estrella en vez de ser en triángulo).

3.ª Malos contactos en las uniones de los conductores del rotor.

4.ª Cortocircuito en una fase o entre fases.

c) **Calentamiento excesivo.** — En el estator; causa: cortocircuito en una fase o entre fases: la temperatura es muy elevada en algunos puntos del devanado.

En el rotor; causa: malos contactos en las uniones de los conductores.

APÉNDICE

Reglas de unificación del material eléctrico en Francia, establecidas por el Comité electrotécnico francés y adoptadas por la Unión de Sindicatos de Electricidad

Máquinas eléctricas

1. **Observación preliminar.** — Las presentes reglas tienen por objeto formular las *reglas del arte* que constituyen la ley de las partes contratantes, sea en ausencia de convención expresa, sea en el caso en que ellas se refieran simplemente a las prescripciones generales del Comité electrotécnico francés.

Se refieren, pues, particularmente a las máquinas de venta corriente; pero serán útilmente completadas por cláusulas discutidas entre los contratantes cuando se trate de una máquina de importancia o de construcción excepcional.

Estas reglas no son inmutables, y su revisión se emprenderá siempre que la experiencia de su empleo o los progresos de la técnica demuestren la necesidad de ello.

Definiciones generales

2. **Régimen normal.** — El régimen normal de una máquina está constituído por el conjunto de condicio-

nes de funcionamiento, relativas a la velocidad, a la tensión, a la corriente, al factor de potencia, etc., tales como están señaladas sobre la placa de la máquina.

3. La **potencia normal,** o abreviadamente, la *potencia* de la máquina es aquella que corresponde al régimen normal. Debe ser obtenida satisfaciendo a las condiciones prescritas en las presentes reglas.

OBSERVACIÓN. — Es cómodo designar simplemente una máquina por su potencia con régimen normal; hagamos observar que debe sobreentenderse como sigue:

Para los generadores de corriente continua, la potencia aparente en los bornes, expresada en kilowatts (Kw);

Para los alternadores, la potencia aparente en los bornes, expresada en kilovolts-amperes (K. V. A.);

Para los motores, la potencia mecánica disponible sobre el eje, expresada en kilowatts;

Para los transformadores, la potencia eléctrica aparente en los bornes del secundario, expresada en kilovolts-amperes.

4. **Servicio.** — El servicio continuo es aquel que una máquina puede soportar sin interrupción durante un tiempo ilimitado, sin que la temperatura y el calentamiento pasen los límites fijados por las presentes reglas y sin sufrir deterioro alguno.

5. El **servicio discontinuo** es aquel que una máquina puede soportar sin interrupción durante un tiempo limitado, sin que la temperatura y el calentamiento pasen los límites fijados por las presentes reglas y sin que la máquina sufra deterioro de ninguna clase.

Observaciones. — 1.º Se recomienda referir, preferentemente, la duración del servicio discontinuo a uno de los siguientes valores-tipo: 5, 10, 15, 30, 60 y 120 minutos.

2.º Un *servicio cíclico*, es decir, un servicio discontinuo que se reproduce periódicamente, puede, generalmente, ser reemplazado para el ensayo, por un servicio térmicamente equivalente. Este último está definido por un régimen constante sostenido durante una duración limitada y calculado de manera que produzca los mismos calentamientos límites que el servicio cíclico. Estos son los regímenes de duración que debe llevar la placa de la máquina.

6. Rendimiento verdadero. — El rendimiento verdadero de una máquina es la relación de la potencia real restituída o potencia útil P_u a la potencia real absorbida P_a.

7. Rendimiento aproximado. — Para un generador el rendimiento aproximado es igual a la relación de la potencia real restituída a la suma de ésta y las pérdidas medibles.

Para un receptor el rendimiento aproximado es igual a la relación de la diferencia entre la potencia real absorbida P_a y las pérdidas medibles a la misma potencia P_a.

Observación. — Estando ligada la potencia que puede desarrollar una máquina a la necesidad de disipar el calor debido a las pérdidas, la consideración de rendimiento está enteramente subordinada a la de pérdida. Por otra parte, en las máquinas de corriente alterna, la noción de rendimiento puede conducir a confusiones, a causa de la distinción entre las potencias reales, reactivas y aparentes.

Es, pues, preferible, siempre que sobre este punto se juzguen necesarias prescripciones particulares, definir y limitar separadamente cada una de las pérdidas fácilmente medibles.

DEFINICIONES PARTICULARES

8. Variación de la tensión. — La variación de tensión (llamada a veces autorregulación) no concierne más que a los generadores y a los transformadores de corrientes. Conviene distinguir la *elevación relativa de tensión* y la *caída relativa de tensión.*

1.º *Elevación relativa de tensión.* — La elevación relativa de tensión es el valor relativo del aumento de tensión $(u_v - u_n)$ obtenido al pasar del régimen normal al funcionamiento en vacío referido a la tensión normal u_n, es decir:

$$\frac{u_v - u_n}{u_n}.$$

2.º *Caída relativa de tensión.* — La caída relativa de tensión es el valor relativo de la disminución de tensión $(u_n - u_e)$ obtenida al pasar del funcionamiento en vacío y a la tensión de régimen normal (u_n), al funcionamiento con las corrientes y factor de potencia del régimen normal, referida a la tensión normal (u_n), es decir:

$$\frac{u_n - u_e}{u_n}.$$

La variación de tensión se entiende siempre a velocidad o frecuencia mantenida en los valores del régimen normal, a la temperatura correspondiente a la marcha del régimen normal, y sin alterar en nada las disposiciones materiales de los aparatos.

OBSERVACIONES. — 1.º Para las *máquinas con exci-*

tación independiente (generadores de corriente continua, alternadores...) la excitación debe ser mantenida constante, y se especifica, de preferencia, la *elevación de tensión*.

Para los *alternadores*, esta especificación es indispensable, o, en su defecto, la de la corriente de cortocircuito definida en el artículo 10;

2.° Para las *máquinas autoexcitatrices* (generadores de corriente continua, conmutatrices...), la resistencia del circuito de excitación no debe modificarse, y se especifica, de preferencia, la *caída de tensión*. Pero para las máquinas de corriente continua de venta corriente, esta caída de tensión no tiene interés más que en casos particulares (máquinas que tengan que marchar en paralelo, etc.);

3.° Salvo convenciones contrarias, las *escobillas de las máquinas con colector* (generadores de corriente continua, conmutatrices...) son mantenidas en una posición satisfactoria para el régimen normal;

4.° Para los *transformadores* y *conmutatrices* la tensión primaria es mantenida constante, como la frecuencia.

9. Variación cinética de tensión. — La variación cinética de tensión es la relación de dos valores relativos: el de la variación de tensión y el de la variación de velocidad, que la determina.

OBSERVACIÓN. — La consideración de la variación cinética de tensión es particularmente importante para los alternadores con excitatriz directamente acoplada. Su valor en este caso debe ser del orden 3 ó 4 a lo más, en los alrededores del régimen normal.

Para los generadores de corriente continua debe ser de 2 ó 3 a lo más; esta condición resulta, generalmente, satisfecha por la construcción corriente.

10. Funcionamiento en cortocircuito. — A veces, hay interés en especificar ciertos elementos en el funcionamiento en cortocircuito de una máquina.

La *tensión de cortocircuito de un transformador* es aquella que es necesario aplicar a los bornes del primario para obtener la circulación de corriente normal en el arrollamiento secundario cerrado sobre sí mismo.

La *corriente de cortocircuito* de un alternador es la corriente *permanente* que se obtiene en el inducido cerrado sobre sí mismo cuando la corriente de excitación es igual a la que da *en vacío,* la tensión de régimen normal a la frecuencia normal.

OBSERVACIÓN. — Cuando la corriente de cortocircuito es demasiado intensa para no permitir efectuar el ensayo con toda seguridad, debe ser obtenida para un valor más pequeño de la excitación y extrapolar.

11. Forma de onda. Coeficiente de deformación.— La forma de onda ideal de la fuerza electromotriz de un alternador es la sinusoide: las formas realizables se separan más o menos de ella.

La *sinusoide equivalente* a una forma dada es la que posee el mismo valor eficaz. Superpuesta a la forma real, acusa diferencias en las ordenadas. El máximo de estas diferencias, referido a la ordenada máxima de la sinusoide, es el *coeficiente de deformación.*

Toda forma cuyo coeficiente de deformación sea inferior a 0,05, es considerada como prácticamente sinusoidal.

Datos útiles para la oferta y la demanda de máquinas eléctricas

Datos generales

Observación. — La expresión *máquina* es empleada en este texto en su sentido más general, a fin de evitar la repetición constante de las palabras *máquinas*, *transformadores*, y otros *aparatos* de inducción.

12. Los **puntos que deben ser objeto de un acuerdo** entre comprador y vendedor de una máquina eléctrica son, como mínimo, los siguientes:

1.° El régimen normal de funcionamiento;

2.° El género de servicio previsto;

3.° La temperatura ambiente máxima del aire en el cual la máquina está destinada a funcionar;

4.° La altitud del lugar de empleo, si pasa de los 1 000 metros;

5.° Las indicaciones particulares relativas a los arrollamientos, a los acoplamientos, etc.;

6.° Finalmente, las indicaciones particulares relativas a los detalles mecánicos, tales como disposiciones de protección, de refrigeración, etc.

Observaciones. — § 2. En ausencia de toda indicación, una máquina se supone destinada a un servicio continuo.

§ 3. La temperatura del agente refrigerante se supone como máximo de 40° C. para el aire y de 25° C. para el agua, en ausencia de toda indicación diferente.

§ 4. Con altitudes superiores a 1 000 metros el poder refrigerante del aire resulta considerablemente

disminuído, el régimen debe ser apropiado a esta condición de empleo.

§ 5. Debe hallarse expresamente indicado si el aparato está destinado a funcionar en paralelo con otros.

§ 6. Debe indicarse si la máquina ha de ir provista de disposiciones de protección contra los choques, el polvo, las proyecciones de agua, el acceso de gases combustibles, etc.; si debe ser refrigerada artificialmente, por ventilador independiente o por circulación de agua, etc., en este caso indicar la presión, el caudal y la temperatura a la entrada necesaria para el flúido refrigerante.

Datos especiales para cada tipo de máquina

El **detalle de las indicaciones que se han de dar** para las diversas categorías de máquinas es el siguiente:

Observación. — Cuando uno de los datos característicos de una máquina, tensión, corriente o velocidad, se prevé que puede variar entre dos límites, los límites correspondientes de los otros datos deben asimismo ser indicados expresamente.

13. Generadores de corriente continua.

Potencia en los bornes, en kilowatts;
Género de servicio;
Tensión entre bornes, en volts;
Corrientes, en amperes;
Velocidad de rotación, en vueltas por minuto;
Modo de excitación.

Observación. — Para la tensión, es recomendable atenerse a las tensiones correspondientes a las tensiones-tipo (115, 230 y 460) aumentadas en un 10 % aproximadamente, a saber: 125, 250 y 500 volts.

14. Motores de corriente continua.

Potencia sobre el eje, en kilowatts;

Género de servicio;

Tensión entre bornes, en volts;

Corriente aproximada, en amperes;

Velocidad de rotación, en vueltas por minuto;

Modo de excitación.

OBSERVACIÓN. — Para la *tensión*, es recomendable atenerse a las tensiones-tipo de distribución, a saber: 115, 230 y 460 volts.

15. Alternadores sincrónicos.

Número de fases;

Frecuencia, en períodos por segundo;

Potencia aparente en los bornes, en kilovolts-amperes;

Género de servicio;

Tensión entre bornes, en volts, a la potencia normal;

Factor de potencia del circuito que se ha de alimentar;

Corriente, en amperes;

Velocidad de rotación, en vueltas por minuto;

Tensión de excitación, en volts;

Corriente máxima de excitación, en amperes;

Elevación de tensión, en centésimas, para el factor de potencia especificado.

OBSERVACIONES. — Es recomendable atenerse a los valores-tipo de distribución, a saber:

Para la frecuencia.	50 períodos por segundo.
Para el número de fases.	3 » »

Para las tensiones, a las tensiones-tipo de distribución aumentadas aproximadamente en un 10 %, a saber:

Para la *corriente trifásica* (para la cual las tensiones-tipo de distribución hasta 10 000 volts son: 115, $115\sqrt{3} = 200$, 500, 1 000, 3000, 5 500, 10000 volts): 125, 220, 550, 1000, 3500, 6000 y 11 000.

Para la *corriente monofásica* (para la cual las tensiones-tipo de distribución son 115 y 230 volts): 125 y 250 volts.

Salvo indicación en contra, el factor de potencia será supuesto igual a 0,8.

16. Motores sincrónicos.

Número de fases;

Frecuencia, en períodos por segundo;

Potencia sobre el eje, en kilowatts;

Género de servicio;

Corriente aproximada, en amperes;

Tensión de alimentación, en volts;

Velocidad de rotación, en vueltas por minuto;

Factor de potencia;

Potencia reactiva que hay que suministrar, si el motor está destinado a mejorar el factor de potencia de una red;

Tensión de excitación, en volts;

Corriente máxima de excitación, en amperes;

Método previsto para la puesta en marcha, y manantial de potencia disponible a este efecto.

OBSERVACIONES.—1.º A falta de indicación, el motor debe desarrollar toda su potencia bajo el factor de potencia 1,00.

2.º Para la *frecuencia*, el *número de fases* y la *tensión de alimentación*, es recomendable atenerse a valores correspondientes a los valores-tipo de distribución.

17. Motores asincrónicos.

Número de fases;

Frecuencia, en períodos por segundo;
Potencia mecánica sobre el eje, en kilowatts;
Género de servicio;
Tensión de alimentación, en volts;
Corriente aproximada, en amperes.
Velocidad de rotación a potencia normal, en vueltas por minuto;
Disposición del rotor, bobinado o de jaula de ardilla;
Disposición de arranque;
Tensión entre anillos, en reposo, para los motores sin colector diferentes de los de cortocircuito permanente;
Relación entre el par de arranque y el par normal;
Corriente de arranque, en amperes.

OBSERVACIONES. — Salvo indicación en contra, se supone que el estator recibe la corriente de alimentación.

Las dos últimas indicaciones están dadas para el conjunto del motor y de los aparatos de arranque.

18. Transformadores de corriente alterna.

Número de fases;
Frecuencia, en períodos por segundo;
Potencia aparente en los bornes del secundario, en kilovolts-amperes;
Género de servicio;
Tensión primaria entre bornes;
Tensión secundaria entre bornes, en vacío y en carga a la potencia normal, con indicación del factor de potencia del circuito alimentado;
Tensión de cortocircuito;
Corriente primaria, en vacío;
Factor de potencia del ensayo en cortocircuito.

Además, para los transformadores de corrientes trifásicas.

Modo de conexión de los arrollamientos conforme a los diagramas detallados más adelante.

OBSERVACIONES. — 1.º Cualquiera que sea el papel de un transformador elevador o rebajador, los bornes *primarios* son aquellos que van conectados al manantial de energía, los bornes *secundarios* son los que van unidos a los aparatos receptores de energía;

2.º Cuando los transformadores deben llevar *bornes neutros* o *tomas intermedias de corriente*, las indicaciones correspondientes deben ser detalladas;

3.º Para los transformadores refrigerados por circulación forzada de aire, de aceite o de agua, se indicará el caudal de flúido, la presión necesaria para asegurar la circulación en el aparato y, finalmente, la temperatura del flúido refrigerante a su entrada en el transformador;

4.º A falta de indicación en contra, el factor de potencia del circuito alimentado por el secundario se supondrá igual a 0,8.

19. Conmutatrices de corriente alterna en corriente continua.

Potencia en los bornes del lado de continua, en kilowatts;

Género de servicio;

Tensión del lado de continua;

Corriente continua;

Número de fases de la corriente de alimentación y de la conmutatriz;

Frecuencia de la corriente alterna;

Factor de potencia si es necesario;

Modo de arranque.

MARCAS DE LOS BORNES DE LOS TRANSFORMADORES, DIAGRAMAS

29. Los *bornes* de todos los transformadores están marcados como se dice a continuación; los transformadores polifásicos llevan además un *diagrama vectorial* que da las relaciones de las fases (cuadro).

30. Marcas de los bornes.—Los bornes de un transformador sencillo van marcados con las letras T para el circuito de alta tensión y t para el circuito de baja tensión.

El borne neutro, cuando existe, va marcado por las letras N o n.

Las letras van acompañadas de subíndices 0, 1, 2, etc., en un orden de sucesión tal que crezcan en el mismo sentido que la fuerza electromotriz en cada circuito en el mismo instante.

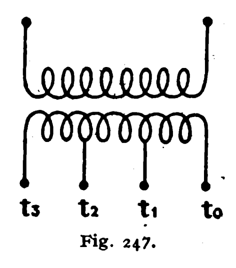


Fig. 247.

EJEMPLO (fig. 247). —Si el transformador lleva dos o más arrollamientos destinados a ser acoplados en serie o en paralelo, los subíndices son sencillos para el primero, doblados para el segundo (11, 22) y así sucesivamente.

Los *bornes de un transformador trifásico* van marcados de acuerdo con las indicaciones que se detallan a continuación:

31. Diagrama vectorial. —El diagrama vectorial indica las relaciones de fase de los circuitos de alta y baja tensión. Las letras mayúsculas se refieren a los circuitos de alta tensión, las minúsculas a los circuitos de baja tensión.

32. Las figuras 248 a 255 del cuadro adjunto dan, para los principales agrupamientos, los diagramas vectoriales que hay que marcar sobre la placa; a título indicativo solamente, se han indicado respectivamente los correspondientes diagramas de conexiones, con las marcas de los bornes.

En el cuadro no figuran los montajes en zigzag, cuya representación está reservada.

CONDICIONES A LAS CUALES DEBE SATISFACER UNA MÁQUINA ELÉCTRICA

33. OBSERVACIÓN. — Se trata aquí de las condiciones a las cuales debe satisfacer una máquina en el caso de que los contratantes se hayan referido a las prescripciones generales del Comité electrotécnico francés, sin formular condiciones particulares para derogarlas.

TEMPERATURAS. — CALENTAMIENTOS

34. Potencia. — El ensayo de la máquina se hace al régimen normal, la temperatura del medio refrigerante no pasará de 40° para el aire ni de 25° para el agua.

35. Duración. — El ensayo de una *máquina destinada a un servicio continuo* se prolonga hasta que sea manifiesto que los calentamientos y las temperaturas límites no serán sobrepasados.

Prácticamente se puede, para abreviar la duración, forzar el régimen durante la primera parte del ensayo y volver en seguida al régimen normal.

Se admite que se ha alcanzado el estado estacionario cuando el calentamiento no aumenta en más de una cantidad superior a 1° por hora.

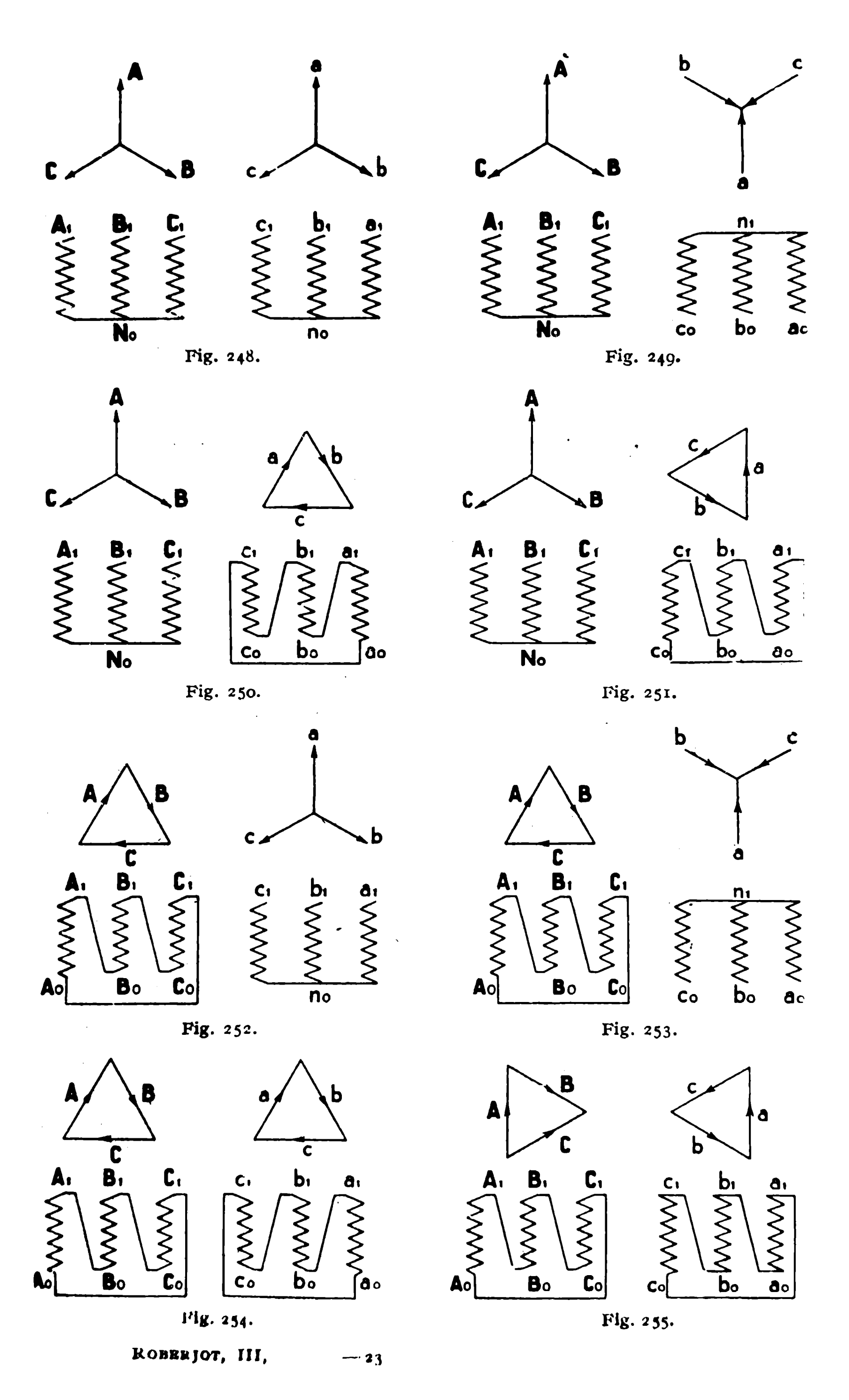


Fig. 248.

Fig. 249.

Fig. 250.

Fig. 251.

Fig. 252.

Fig. 253.

Fig. 254.

Fig. 255.

36. El ensayo de una *máquina destinada a un servicio discontinuo*, y, en general, de toda máquina objeto de condiciones convencionales especiales, se hace en las mismas condiciones que definen su servicio.

37. Un servicio cualquiera puede ser reemplazado, generalmente, por un régimen *térmicamente equivalente*, sea continuo, sea discontinuo, siempre que la comparación se efectúe sobre el órgano más saliente.

38. Temperaturas observadas. —Las temperaturas observadas son los valores dados por los métodos de medida definidos en las presentes reglas y efectuados sobre las máquinas enteramente terminadas y montadas. Estas temperaturas difieren de las temperaturas máximas que no pueden ser medidas más que adoptando, durante la construcción, ciertas disposiciones de empleo excepcional (pares termoeléctricos o resistencias dispuestas en las partes profundas de la máquina).

Los límites de temperatura precisados en las presentes reglas se refieren a las temperaturas observadas.

39. Comienzo del ensayo. —El ensayo no puede ser comenzado más que cuando la máquina se halla en equilibrio de temperatura con el medio ambiente.

Sin embargo, para las máquinas destinadas a un servicio continuo, puede no esperarse el equilibrio perfecto, si la resistencia inicial se mide con las precauciones indicadas en el núm. 42.

40. Medición de las temperaturas. —Las temperaturas de las diversas partes de una máquina se deter-

minan con auxilio del termómetro, o bien por la medición de la resistencia de los arrollamientos.

La medición por la variación de resistencia es la regla para los arrollamientos; el termómetro no se empleará más que si el otro método es inaplicable o inoportuno.

41. La temperatura observada es la temperatura más alta indicada por el termómetro colocado en el sitio accesible más caliente de un órgano de la máquina, o la temperatura calculada por la resistencia, para los arrollamientos.

42. Cuando una temperatura ha de ser determinada por resistencia, es preciso asegurarse, antes del ensayo, por medio del termómetro, de que la temperatura del arrollamiento no difiere en más de 3º de la temperatura ambiente.

La temperatura final del arrollamiento se calcula por medio de la relación de resistencias y de la temperatura inicial, indicada por el termómetro, de este arrollamiento.

43. Las temperaturas de los arrollamientos en cortocircuito permanente, las de otros órganos que no sean los arrollamientos, así como las temperaturas locales más elevadas en sitios accesibles cualesquiera de las máquinas, se miden por medio del termómetro aplicado a su superficie.

Se tomarán, si es posible, las temperaturas en marcha y después de la parada, adoptándose el más alto de los dos valores como resultado de la medición.

44. Temperatura del agente refrigerante. — La temperatura del aire ambiente se mide por medio de termómetros distribuídos alrededor de la máquina, a

media altura, a una distancia de 1 a 2 metros, y protegidos de las corrientes de aire y de la radiación directa de la máquina.

El valor que hay que adoptar en el cálculo del calentamiento es el medio de las lecturas hechas a intervalos de tiempo iguales durante el último cuarto de la duración del ensayo.

La temperatura del aire a la entrada de una máquina de ventilación forzada se mide con el termómetro a la entrada en la máquina.

La temperatura del agua de refrigeración se mide con el termómetro a su entrada en la máquina.

45. Modos de medida.—La temperatura se medirá como se indica a continuación en algunos casos particulares.

46. Generadores y motores de corriente continua. —La temperatura de los inductores se determina por resistencia, cualquiera que sea el modo de excitación.

La temperatura del inducido se determina con el termómetro colocado sobre el arrollamiento en el lugar accesible más caliente, cuando el método por resistencia es inaplicable o inoportuno.

OBSERVACIÓN. —Cuando se emplea el termómetro es recomendable el siguiente método operatorio:

La temperatura del inducido se determina como sigue: sobre el hierro, por aplicación de un termómetro en el punto accesible más caliente; sobre los conductores con ayuda de tres termómetros, aplicados inmediatamente después de la parada, a saber: dos de ellos a la salida de las ranuras y lo más cerca posible del hierro sin tocarlo, uno del lado del colector y otro del lado opuesto, el tercero en el centro de las ranuras y lo más cerca posible del hierro sin tocarlo.

Se admitirá, como temperatura del arrollamiento del inducido, la más alta de las tres lecturas. Si el tercer termómetro no puede aplicarse, se admitirá, como temperatura, la más elevada de las lecturas de los dos termómetros aumentada en un 3 %.

Las temperaturas se leerán después de cinco minutos de aplicación de los termómetros.

47. Alternadores y motores sincrónicos. — La temperatura de los inductores se determina por resistencia.

La temperatura del inducido se determina por resistencia si el método es aplicable, debiendo asegurarse por el termómetro de que no existen, en los arrollamientos, temperaturas locales más elevadas que las que se indican en el siguiente cuadro de temperaturas límites.

Si el método por resistencia es inaplicable o inoportuno, la temperatura se determina por termómetros colocados sobre los arrollamientos en los puntos accesibles más calientes.

48. Motores asincrónicos sin colector. — Las temperaturas del estator y del rotor se determinan como las del inducido de un alternador sincrónico, salvo en el caso de que el arrollamiento esté continuamente cerrado sobre sí mismo sin conexión con el exterior, en cuyo caso se emplea el termómetro.

49. Transformadores. — La temperatura de los arrollamientos se determina por resistencia.

50. Coeficiente de variación del cobre con la temperatura. — En las mediciones de temperatura por resistencia del cobre, se aplicarán los valores

indicados en la adjunta tabla, deducidos de la fórmula $\frac{1}{234,5+t}$ por grado centígrado, en la cual t es la temperatura inicial del arrollamiento; así a una temperatura inicial de 30° corresponde un coeficiente de $\frac{1}{264,1} = 0,00378$.

Temperatura de los arrollamientos a la cual se mide la resistencia inicial	Aumento relativo de resistencia por grado centígrado
0°	0,00427
5°	0,00418
10°	0,00409
15°	0,00401
20°	0,00393
25°	0,00385
30°	0,00378
35°	0,00371
40°	0,00364

51. Límites de temperatura y de calentamiento. — Los máximos de temperatura que una máquina debe soportar en sus diversas partes son aquellos que resultan compatibles con la conservación de sus aislantes. Estos límites pueden ser determinados para cada aislante; son, pues, las temperaturas más elevadas de cada parte de la máquina que sería deseable conocer. Como corrientemente esto es imposible, conviene limitar las temperaturas observadas a valores bastante bajos para tener en cuenta la diferencia entre los valores observados y los valores máximos de los errores de medida, así como la posibilidad de sobrecargas accidentales.

Los calentamientos admisibles se deducen simplemente de las temperaturas límites deduciendo de

	Naturaleza del aislante de los arrollamientos o designación del órgano	Límite admisible	
		Temperatura observada	Calentamiento
1	Algodón sin impregnar	80° C.	40° C.
2	Algodón impregnado o sumergido en aceite, papel — por el termómetro	90°	50°
	Algodón impregnado o sumergido en aceite, papel — por resistencia	95°	55°
3	Arrollamientos impregnados, macizos, alojados en ranuras	95°	55°
4	Alambre esmaltado	reservado	
5	Mica, amianto, vidrio, porcelana, micanita y compuestos análogos	115°	75°
6	Arrollamientos continuamente cerrados sobre sí mismos — aislados	100°	60°
	Arrollamientos continuamente cerrados sobre sí mismos — sin aislar	110°	70°
7	Colectores, anillos	90°	50°
8	Cojinetes	80°	40°

éstas 40° C., límite superior de la temperatura del aire ambiente.

En consecuencia, los calentamientos medidos al final del ensayo en régimen normal no deben sobrepasar, en ninguna de las partes de la máquina, los valores límites de la segunda columna de la tabla de la página 359.

Observaciones. — El algodón no se considera como impregnado más que si sus fibras se han hecho adherentes entre sí y con el conductor por medio de una sustancia apropiada.

Cuando la impregnación está hecha de manera que se forme una masa llena sin espacios de aire que une los conductores entre sí, se dice que los arrollamientos son *macizos*.

La materia que se emplee para la impregnación debe mantenerse sólida por encima de 100° C.

52. Los límites de temperatura y de calentamiento indicados en el artículo precedente, desde el punto de vista eléctrico, cesan de aplicarse a las máquinas rotativas cuya tensión entre bornes pase de 5 000 volts y a los transformadores secos cuya tensión entre bornes pase de los 10 000 volts.

53. Para los inductores, móviles o fijos, constituídos por una sola capa de barras y para los arrollamientos macizos inmóviles, se admite un exceso de 5° C. sobre las temperaturas de calentamiento límites indicadas en el artículo 51.

54. Las temperaturas de los núcleos de hierro en contacto con los arrollamientos no deben ser mayores que las temperaturas admitidas para dichos arrollamientos.

55. Las temperaturas de los núcleos de chapa que no están en contacto con los arrollamientos, no deben ser mayores de 110° C.

56. Cuando el aislamiento comprende varias materias aislantes diferentes, a excepción del aceite de transformadores, la temperatura límite es la más baja de las que corresponden a los diversos aislantes empleados; el aislante, aun formando soporte, se supone siempre que constituye parte del arrollamiento.

57. Correcciones. — Los calentamientos indicados en la segunda columna de la tabla precedente han sido obtenidos deduciendo a las temperaturas límites el valor de 40°, máximo de la temperatura ambiente, para la cual estas reglas se consideran aplicables.

No se efectuará ninguna corrección cuando en el ensayo la temperatura ambiente sea inferior a 40°, pues los valores de la segunda columna de la tabla son valores límites de calentamiento (elevación de temperatura), cualquiera que sea la temperatura ambiente.

RIGIDEZ DIELÉCTRICA

59. La prueba de la rigidez dieléctrica de los aislantes se efectúa en los talleres del constructor y, preferentemente, inmediatamente después del ensayo de calentamiento, a fin de que la máquina se encuentre a una temperatura próxima a la de régimen. Consiste en la aplicación de la tensión indicada en el artículo siguiente.

Esta tensión es alterna, de una frecuencia comprendida entre 20 y 100 períodos por segundo, de una forma prácticamente sinusoidal. La tensión se aplica

entre cada uno de los circuitos y el conjunto de los demás y de la masa, puesta a tierra.

La aplicación de la tensión debe ser progresiva.

60. Tensión de prueba y duración de la aplicación. —Las tensiones de prueba de las máquinas son las indicadas en la tabla de la página 363.

La duración de la aplicación de la tensión de prueba debe ser de un minuto.

OBSERVACIONES. — 1.º Si el circuito de excitación de un alternador va provisto de un interruptor, una convención especial debe intervenir y prever un valor mucho más elevado aún de la tensión de prueba.

La excitatriz y el reostato de excitación principal se ensayan a la tensión correspondiente a la excitación que ellos sirven.

2.º La tensión de prueba del arrollamiento inducido de un motor asincrónico se calcula según el valor más elevado de una cualquiera de las tensiones medibles entre anillos, a circuito abierto.

3.º El reostato de arranque de un motor asincrónico, como en general todos los accesorios de las máquinas, está sometido a la misma tensión de prueba que el circuito a que va ligado.

CONMUTACIÓN

61. Las máquinas con colector para servicio continuo deben funcionar con un calado fijo de las escobillas, para todas las cargas, sin chispas apreciables. Con la sobrecarga momentánea (núm. 64) que lleva la corriente a 1,5 veces su valor normal, no deben manifestarse chispas destructivas.

Las máquinas con colector para servicio discontinuo deben funcionar con calado fijo de las escobillas en

	Naturaleza de la máquina o del circuito de ensayo	Tensión de prueba en volts	Observaciones
1	Máquina de potencia inferior a 1 Kw.	2,5 U	
2	Máquina de potencia superior a 1 Kw. y en general todos los aparatos y partes de aparatos no consignados en esta tabla	$2U + 1000$	U = tensión de servicio indicada en la placa
3	Circuitos de tensión superior a 1000 volts	$2U + 1000$	
4	Circuitos secundarios de motores de inducción no construídos para cortocircuito permanente	$2U_1 + 1000$	U_1 = tensión en corto-circuito
5	Circuitos de excitación y excitatrices de alternadores y motores sincrónicos	$10\,U_2$ { mínimo 1500; máximo 3000 }	U_2 = tensión máxima de excitación
6	Transformadores de distribución pública:		
	a — lado de alta tensión	$2{,}5\,U_1 + 1000$ (mínimo 10000)	U_1 y U_2 = tensiones de servicio indicadas en la placa
	b — lado de baja tensión	$2{,}5\,U_2$ (máximo 1000)	

todas las condiciones previstas para su empleo. No deben necesitar ni pulimento ni arreglo del colector durante veinte horas consecutivas de funcionamiento.

Pruebas mecánicas

62. Observaciones. — Todas las máquinas deben satisfacer, desde el punto de vista mecánico, a las condiciones enumeradas más adelante.

Las pruebas destinadas a justificar la observación no se efectúan más que bajo demanda expresa y en los talleres del constructor, salvo convenio en contra.

Si se efectúan inmediatamente después que los ensayos de calentamiento, se deberá vigilar que no tengan por consecuencia el aumento de la temperatura de los arrollamientos a un límite superior al admitido.

63. Exceso de velocidad. — Toda máquina debe soportar durante quince minutos, sin sufrir deformación permanente, una velocidad de rotación cuyo valor sea igual a 1,2 veces la señalada sobre la placa de la máquina.

64. Exceso de par. — Todo generador destinado a un servicio continuo debe soportar, durante cinco minutos, sin sufrir deformación, un exceso de par resistente obtenido llevando el valor de la intensidad de corriente a 1,5 veces el de régimen normal, manteniendo la tensión lo más próxima que se pueda a la normal.

65. Par máximo de los motores. — Se recomienda precisar el valor del par máximo exigido para un motor.

Salvo especificaciones, los motores de corriente

continua y de corrientes polifásicas destinados a un servicio continuo, soportarán, sin una disminución excesiva de marcha, un par resistente igual a 1,5 veces el par normal deducido de las indicaciones de la placa de la máquina.

66. Rendimiento. —Las garantías de rendimiento o de máximo de pérdidas no son exigibles más que si se hallan estipuladas en el contrato de suministro.

Cuando un contrato de suministro exige una garantía de rendimiento, debe estipular al mismo tiempo:

1.° La potencia a la cual se refiere el valor garantizado;

2.° El factor de potencia correspondiente, si lo hay;

3.° El método previsto para la medición;

4.° El lugar donde se efectuará la verificación.

El rendimiento se determinará en condiciones lo más próximas posible a las previstas en el contrato de suministro. Las medidas sufrirán las correcciones calculadas para llevarlas a las condiciones tipo de velocidad, frecuencia, tensión y temperatura.

Las pérdidas auxiliares en las excitatrices, en los reostatos de excitación, así como las debidas a los ventiladores u otros accesorios del funcionamiento, forman parte de la potencia absorbida.

ÍNDICE

CAPÍTULO PRIMERO

Organización de un laboratorio de electricidad

CAPÍTULO II

Comprobación experimental de las propiedades de una dinamo de corriente cóntinua

CAPÍTULO III

Propiedades de las dinamos, según su excitación

CAPÍTULO IV

Pruebas de entrega

CAPÍTULO V

Rendimiento

CAPÍTULO VI

Comprobación experimental de las propiedades de los motores de corriente continua

CAPÍTULO VII

Propiedades de los motores

CAPÍTULO VIII

Determinación del rendimiento de un motor

CAPÍTULO IX

Defectos y accidentes en las máquinas de corriente continua

CAPÍTULO X

Alternadores

Págs.

CAPÍTULO XIV

Defectos y accidentes en las máquinas de corriente alterna

APÉNDICE

TRATADO DE GALVANOTECNIA, por W. PFANHAUSER. Un vol. de 798 págs., de 25 X 16,5 cms., con 335 grabados.

MANUAL DE TELEGRAFIA ELECTRICA, *aérea, submarina y sin hilos*, por R. FERRINI y C. CANTANI. Un volumen de 382 págs., de 19 X 12,5 cms., con 138 grabados.

TRATADO DE TELEGRAFIA Y TELEFONIA. *Guía para los empleados de Telégrafos y Teléfonos*, por C. STRECKER. Un vol. de 696 págs., de 23 X 15 cms., con 535 grabados y esquemas.

MANUAL DEL INGENIERO. *Enciclopedia teórico-práctica del ingeniero y del arquitecto,* compilada y publicada por la ACADEMIA «HÜTTE» E. V., de Berlín. 2.ª ed. Cuatro volúmenes de 19 X 13 cms. TOMO I. *Matemáticas. Mecánica. Física industrial. Calor. Resistencia de materiales. Conocimiento de materiales. Metrología. Topografía.* 1464 págs., con 774 grabados. TOMO II. *Elementos de máquinas. Máquinas motrices. Bombas y compresores. Máquinas-herramienta. Elevación, transporte y almacenaje. Alumbrado. Electrotecnia.* 1560 páginas, con 1991 grabados. TOMO III. *Estática de las construcciones. Fundaciones. Obras de tierra y construcción de túneles. Hormigón armado. Construcción de edificios y fábricas. Calefacción y ventilación. Máquinas empleadas en la construcción. Obras hidráulicas. Carreteras. Urbanización. Puentes. Ferrocarriles.* 1566 páginas, con 1905 grabados. TOMO IV. *Construcción naval, automóviles y aeronaves. Minas. Agricultura. Instalaciones y máquinas auxiliares de la industria. Industrias de la alimentación y afines. Pieles y cueros. Calzado. Industrias papelera y textil. Cerámica. Vidrio. Fabricación del gas. Hornos industriales. Artes gráficas. Mecánica de precisión. Fotografía, cinetecnia y radiotecnia. Extinción de incendios.* 1598 páginas, con 1300 grabados.

FORMULARIO DEL INGENIERO. *Manual práctico para los ingenieros, mecánicos y constructores,* por E. GARUFFA. Un vol. de 704 págs., de 18,5 X 12 centímetros, con 975 grabados y 240 tablas.

COMPENDIO DE RADIOTELEFONIA. *Fundamento, construcción y manejo de una radioestación de aficionado,* por L. F. KENDALL y R. P. KOEHLER, considerablemente ampliado por F. MORAL. 3.ª ed. Un vol. de 418 págs., de 19 X 12,5 cms., con 233 gb.

MANUAL DEL OPERADOR CINEMATOGRAFICO, por J. RUTENBERG y H. STROEDECKE. Un volumen de 310 páginas, de 22,5 X 15,5 cms., con 134 gbs.

TRATADO DE MECANICA INDUSTRIAL, por PH. MOULAN, revisado y ampliado por C. GERDAY. 5.ª ed. Un vol. de 1234 págs., de 23 X 15 cms., con 1401 grabados.

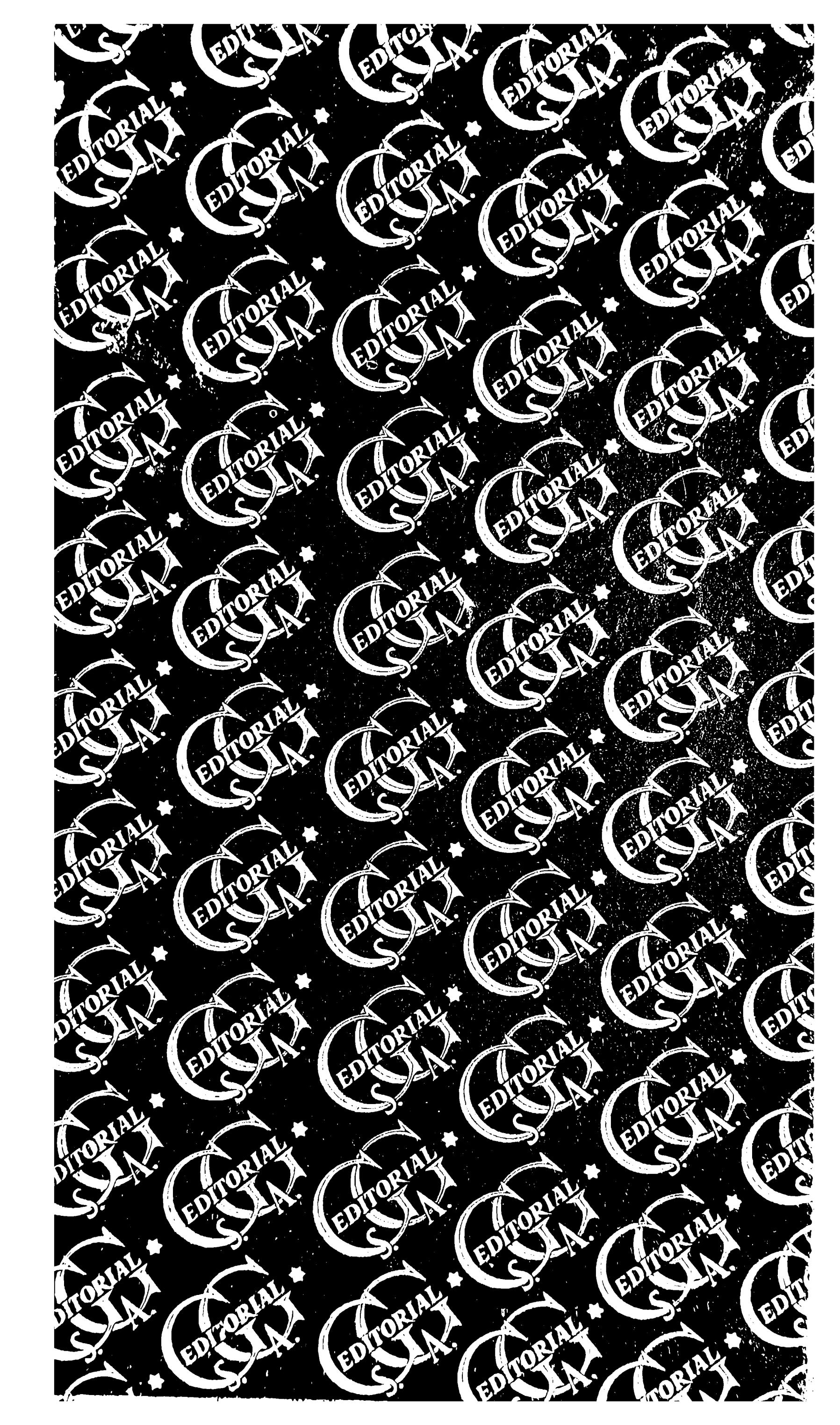
EL MOTOR DE EXPLOSION. *Motores de cuatro y de dos tiempos, motores Diesel, motores sin válvulas,* por E. PETIT. 4.ª ed., revisada por J. MOHR. Un volumen de 528 págs., de 18,5 X 12,5 cms., con 250 grabados.

GUIA DEL MECANICO PRACTICO, por W. WALKER. Un volumen de 508 págs., de 19,5 X 13 cms., con 306 grabados y 22 tablas numéricas.

TRATADO DE LA FUNDICION DEL HIERRO Y DEL ACERO, por B. OSANN. Un vol. de 798 págs., de 25 X 16,5 cms., con 706 grabados.

FISICA MODERNA. *Exposición sintética, al alcance de todos, de las últimas conquistas de la Física contemporánea,* por C. CASTELFRANCHI. 2.ª edición. Un volumen de 750 págs., de 25 X 16 cms., con 219 grabados.

TRATADO DE FISICA, por KLEIBER y KARSTEN. 10.ª ed., revisada y ampliada por H. ALT. Un volumen de 520 págs., de 22 X 16 cms., con 863 grabados y una lámina en color.


EDITORIAL S.A.


EDITORIAL
S. A.

P. Roberjot

ELECTRICIDAD INDUSTRIAL



IV. Instalaciones Interiores

ELEMENTOS DE ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

IV

INSTALACIONES INTERIORES

TIMBRES: TELÉFONOS: ALUMBRADO
MOTORES

ELEMENTOS
DE
ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

POR

P. ROBERJOT

TOMO I
GENERALIDADES

TOMO II
MEDIDAS ELÉCTRICAS INDUSTRIALES

TOMO III
MÁQUINAS ELÉCTRICAS

TOMO IV
INSTALACIONES INTERIORES
TIMBRES : TELÉFONOS : ALUMBRADO
MOTORES

TOMO V
CENTRALES Y REDES

EDITORIAL GUSTAVO GILI, S. A.
Calle de Enrique Granados, 45
BARCELONA

ELEMENTOS
DE
ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

POR

P. ROBERJOT

PROFESOR DE LA ESCUELA INDUSTRIAL DE REIMS

VERSIÓN POR

JOSÉ M.ª MANTERO

LICENCIADO EN CIENCIAS

TOMO IV

INSTALACIONES INTERIORES

TIMBRES : TELÉFONOS : ALUMBRADO

MOTORES

QUINTA EDICIÓN



EDITORIAL GUSTAVO GILI, S. A.

Calle de Enrique Granados, 45

BARCELONA

MCMXLVIII

S. A. D. A. G. — ROSELLÓN, 298. — BARCELONA
Reproducción offset — Grafos, S. A. — Avenida Carlos I, 157 — Barcelona

PRÓLOGO

En esta nueva edición, el capítulo dedicado a los teléfonos ha sido aumentado con la descripción de los principales sistemas de telefonía automática; sin embargo, nos hemos limitado a dar esquemas simplificados, pues los esquemas *completos* son demasiado *complejos* para el profano, y hasta para el mismo técnico no especializado.

El capítulo acerca del alumbrado ha sido completamente rehecho inspirándonos en los datos más recientes de esta rama.

Hemos descrito en detalle los modelos más nuevos de fusibles, los disyuntores de abonados y los cuadros metálicos para contadores.

Se ha dedicado un párrafo a los dispositivos de arranque semiautomático de los motores por botones pulsadores.

Nuestra labor ha sido facilitada por el concurso de los constructores que han tenido la amabilidad de proporcionarnos dibujos de sus aparatos y a los que con mucho gusto nombramos a continuación:

Para la telefonía: la «Omnium Téléphonique», la «Société des Téléphones Ericsson» y la «Compagnie des Téléphones Thomson-Houston».

Para el alumbrado: la «Sociedad Philips» y la «Société pour le perfectionement de l'Éclairage».

Para los aparatos: la «Société Als-Thom», los «Établissements Électra-Unic», la «Fabrique d'appareillage éléctrique» y «La Télémécanique Électrique».

A todos les damos desde aquí las gracias.

CAPÍTULO PRIMERO

Timbres

Campanilla vibrante. — El tipo de timbre más empleado es el de campanilla vibrante, cuyo funcionamiento es fácil comprender mediante el esquema de la figura 1.

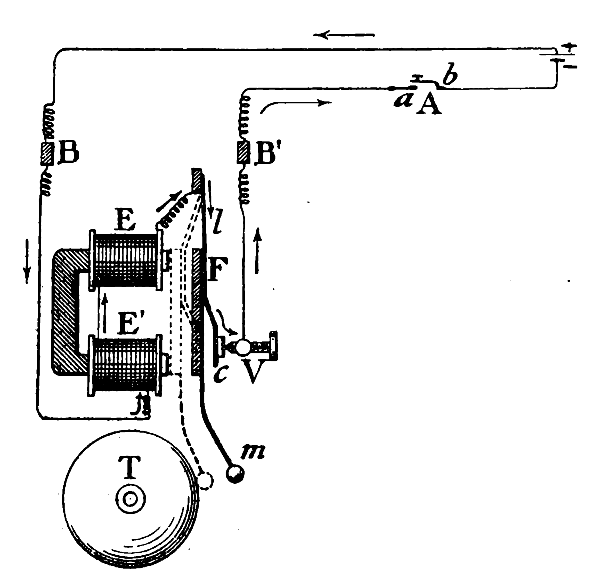


Fig. 1.

Cuando se aprieta el botón de llamada *A*, la corriente que sale de la pila pasa por la armadura *F* y por las

espiras del electroimán EE'; éste atrae a la armadura y el martillo *m* da un golpe contra la campanilla *T*. Entonces queda cortada la corriente, pues la hoja de plata del contacto *c* ya no está en contacto con el tornillo de regulación *V*; el electroimán deja de ser excitado y el muelle *l* vuelve la armadura a su posición primitiva y así sucesivamente, de modo que, mientras se tiene apretado el botón de llamada, los choques se repiten con intervalos cortísimos.

Instalaciones de timbres.—Los esquemas siguientes representan los montajes que hay que hacer para las instalaciones que más se emplean (figs. 2 a 10).

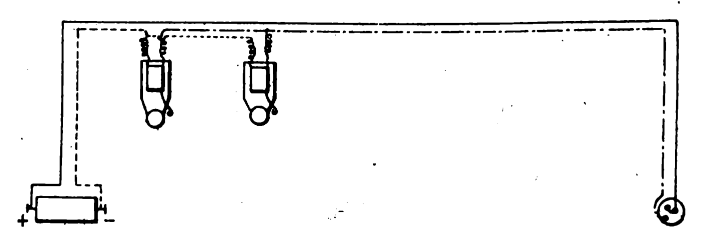


Fig. 2. — Dos timbres accionados a la vez por un botón.

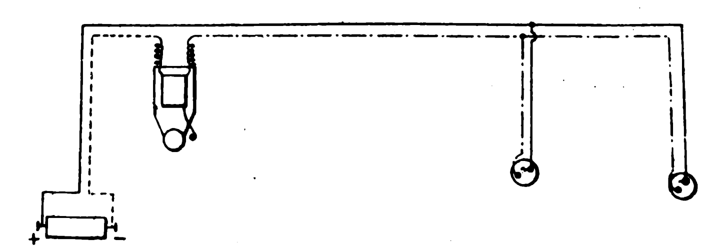


Fig. 3. — Timbre accionado desde dos puntos diferentes.

Se tiene la costumbre de unir el polo positivo de la pila a los aparatos de llamada (a veces se llama a estos conductores «hilos de polo»), el polo negativo se

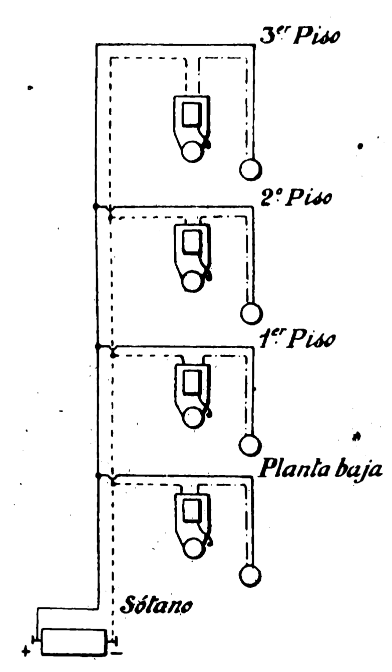


Fig. 4. — Timbres independientes sobre un mismo hilo.

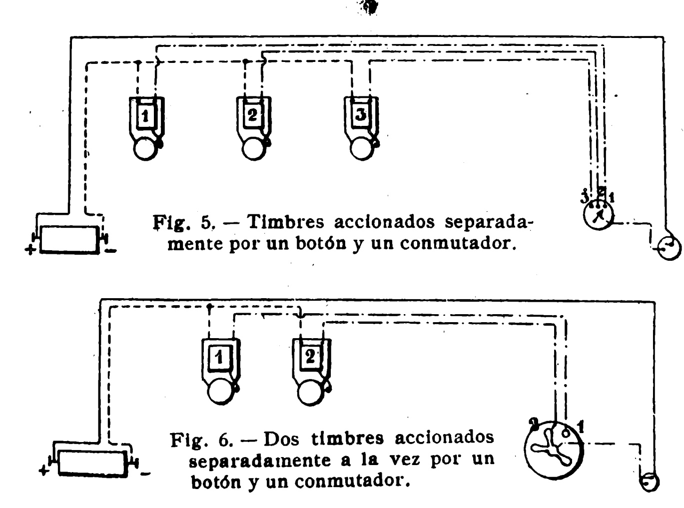


Fig. 5. — Timbres accionados separadamente por un botón y un conmutador.

Fig. 6. — Dos timbres accionados separadamente a la vez por un botón y un conmutador.

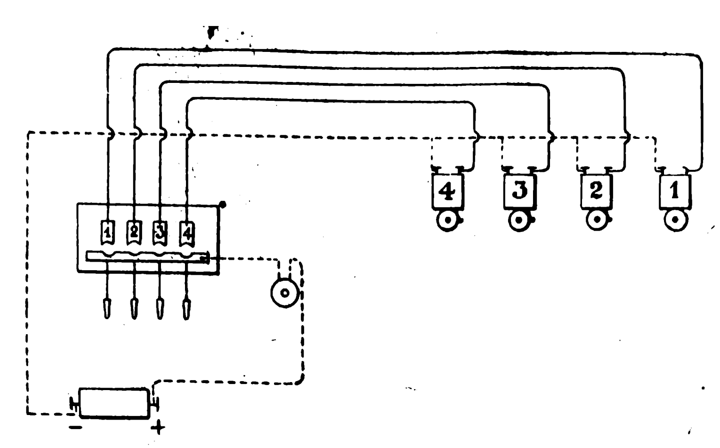


Fig. 7. — Timbres accionados separadamente o en un número cualquiera mediante un botón y un conmutador.

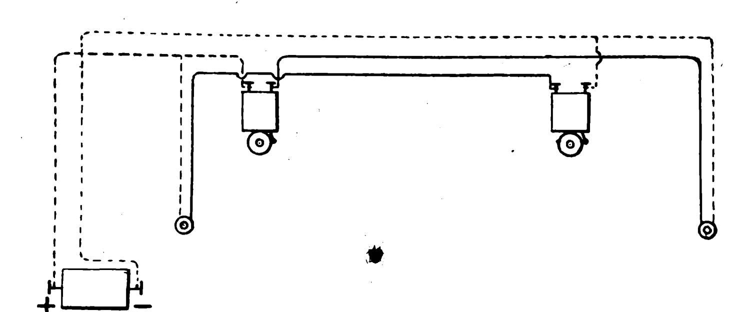


Fig. 8. — Llamada y respuesta con tres hilos.

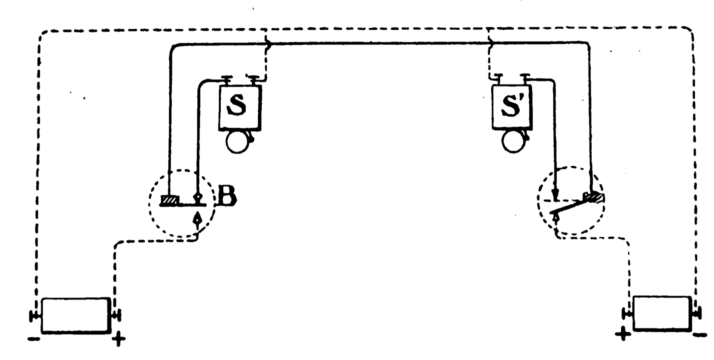


Fig. 9. — Llamada y respuesta con dos hilos.

une a los timbres u otros aparatos receptores; se llama «hilos de unión» a los hilos que unen los boto-

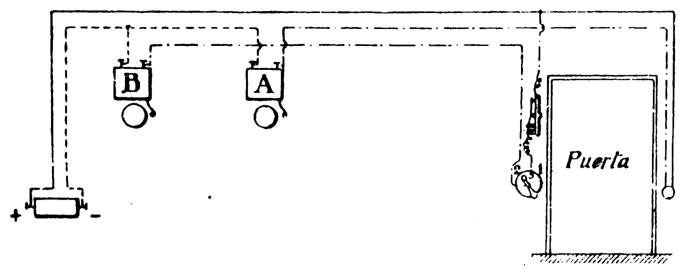


Fig. 10. — El botón hace funcionar el timbre *A*, y el contacto el *B*, si la manilla del conmutador *C* está sobre el tope 1.

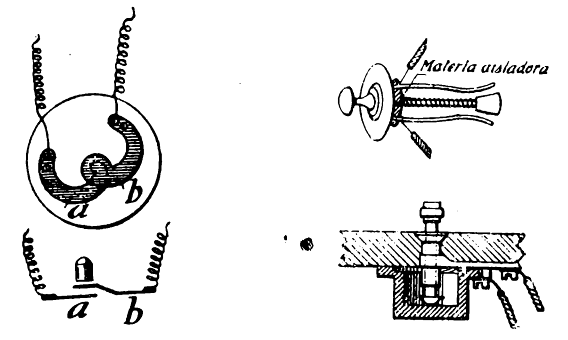


Fig. 11. — Botón ordinario. **Figs. 12 y 13. — Tirador de puerta y pedal.**

nes de llamada con los timbres.

Los aparatos de llamada tienen una de las siguientes formas: de botón, de tirador o de pedal (figs. 11 a 14).

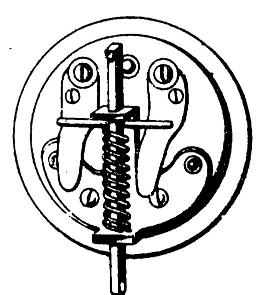


Fig. 14.—Tirador de cordón.

Contactos para puertas.—Son aparatos que sirven para hacer funcionar un timbre cuando se abre una puerta.

Si se quiere que el timbre funcione durante todo el

tiempo que esté abierta la puerta, se emplea un *contacto de puerta* (figs. 15, 16 y 17). Cuando la puerta

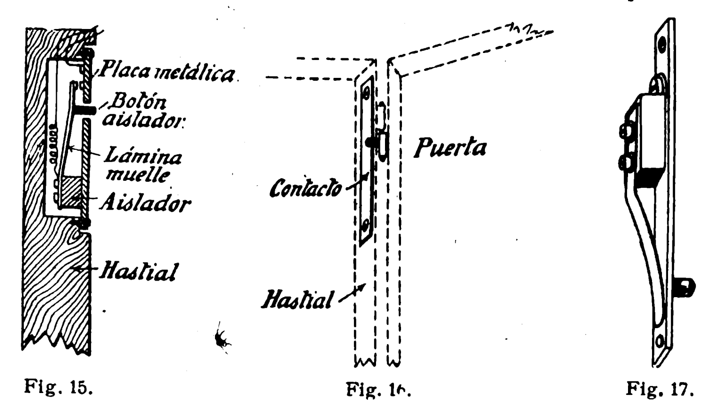
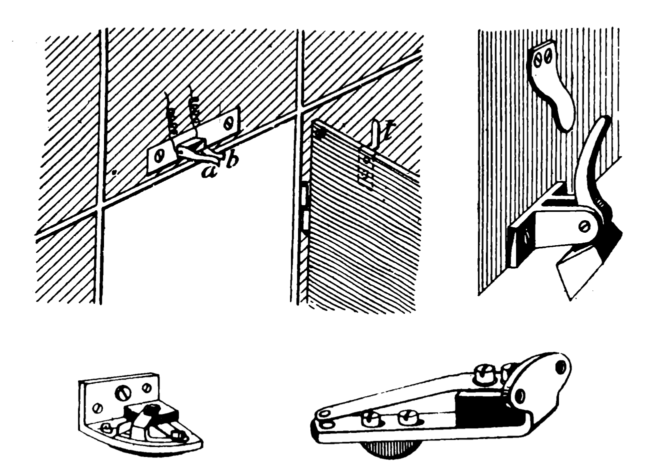


Fig. 15. Fig. 16. Fig. 17.

está cerrada, aprieta al botón aislador y el circuito queda cortado; si se abre la puerta, la lámina curvada



Figs. 18 a 21. — Tres tipos de contactos de paso.

que forma muelle establece contacto y cierra el circuito.

Si el timbre no ha de emplearse más que para advertir el paso por una puerta, debe funcionar sola-

mente al abrir o cerrar ésta, lo cual se consigue por medio de contactos dispuestos sobre la puerta o en el suelo, al nivel del pavimento (figs. 18 a 21).

Timbre con indicador. — Se emplea cuando la persona a quien se llama puede estar ausente, para que al volver pueda conocer por una señal que ha sido llamada durante su ausencia. El esquema de la figura 22

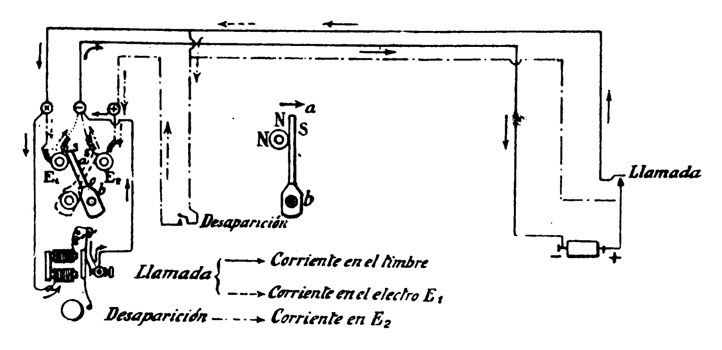


Fig. 22.

permite darse cuenta del funcionamiento de uno de los muchos tipos de timbres de esta clase: si se trata de una clase distinta es fácil, observándola con atención, comprender el funcionamiento y el montaje.

En medio de los electroimanes E_1 y E_2 hay una varilla ab de hierro imanado, móvil alrededor del eje O y que lleva en uno de sus extremos un cartón en cuyo centro hay un signo: la varilla ab se imana transversalmente como indica la figura.

Cuando se aprieta el botón de llamada, pasa una corriente por el timbre y por el electroimán E_1 que está en derivación con él. El sentido del arrollamiento del carrete de E_1 y el de la corriente que lo recorre son tales, que en el extremo superior, sobre el cual se

apoya, cuando no hay corriente, la varilla *ab*, se desarrolla un polo del mismo nombre que el de la cara de *ab* que está enfrente. Esta varilla es repelida, y aparece la señal a través de una pequeña abertura practicada en la caja del timbre.

Para hacer desaparecer la señal y permitir así una nueva llamada, se aprieta el botón de desaparición colocado junto al timbre y pasa una corriente por el electroimán E_2, produciéndose en su núcleo una imanación en sentido contrario a la que se había desarrollado, al llamar, en E_1, y por consiguiente un polo del mismo nombre que el de la cara *ab* que se apoya sobre el carrete de E_2. La varilla es repelida y se detiene al chocar con E_1.

Timbre continuo.—Está construído de tal modo, que cuando se aprieta el botón de llamada se cierra la pila

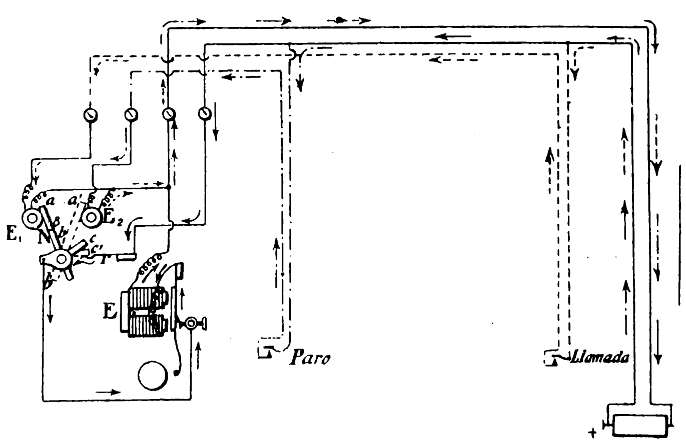


Fig. 23.

sobre el electroimán del timbre, que sigue sonando sin necesidad de mantener apretado el botón.

La persona a quien se haya llamado hace cesar el

repiqueteo apretando un botón de paro que hay junto al timbre.

Hay muchos modos de realizar este funcionamiento: el esquema de la figura 23 basta para comprender fácilmente el funcionamiento y el montaje para cualquier clase de instalación.

Cuando se aprieta el botón de llamada, pasa por el carrete E_1 una corriente cuyo sentido está determinado por el de imanación de las dos caras del brazo imanado *ab* de la palanca *abc*; el brazo *ab* es repelido, y el otro brazo *c* va a apoyarse en *c'* sobre el muelle *r*, quedando así cerrada la pila sobre el electroimán *E* del timbre, que sonará continuamente. Cuando se aprieta el botón de paro, pasa una corriente por E_2 y su sentido es tal, que la palanca *a'b'* es repelida y el brazo *c'* toma su primera posición *c*, y cesa el repiqueteo.

Cuadros indicadores.—Pudiendo sonar un timbre *S* por medio de varios botones 1, 2, 3, es preciso saber de dónde viene la llamada, para lo cual se utilizan los cuadros indicadores. El esquema de la figura 24 permite darse cuenta fácilmente de la construcción, del funcionamiento y del montaje de este aparato. Las varillas imanadas transversalmente P_1, P_2, P_3 llevan indicaciones correspondientes a los botones de llamada 1, 2, 3 y están colocadas cada una entre dos electroimanes Cuando no funciona el timbre, las varillas están apoyadas contra las armaduras de los electroimanes A_1, A_2, A_3 y las indicaciones unidas a estas varillas están ocultas detrás de un vidrio ennegrecido. Cuando se aprieta el botón 1, por ejemplo, el devanado del electroimán A_1 es recorrido por una corriente, y el sentido de esta corriente es tal, que desarrolla en el extremo anterior del núcleo un polo del mismo nombre que el que hay en la cara de la varilla P_1 que se apoya

sobre él. Esta varilla es repelida y hace que su indicación se coloque frente a un círculo transparente practicado en el vidrio ennegrecido, pudiéndose ver desde fuera. De la misma manera aparecerán los números 2 y 3 apretando los botones 2 y 3 respectivamente. Se ve

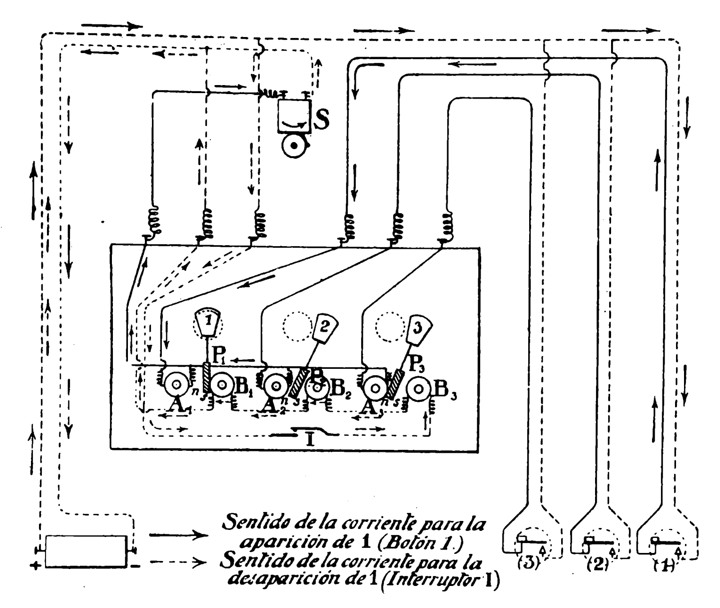


Fig. 24.

además, siguiendo la corriente, que ésta atraviesa el timbre cada vez que se aprieta uno cualquiera de los botones.

Cuando se cierra el interruptor I, los electroimanes B_1, B_2, B_3 son recorridos por una corriente que desarrolla en los extremos anteriores de cada uno de ellos un polo del mismo nombre que el que hay en las caras de las varillas P_1, P_2, P_3 que se apoyan sobre ellos. Estas varillas son repelidas y los números desaparecen.

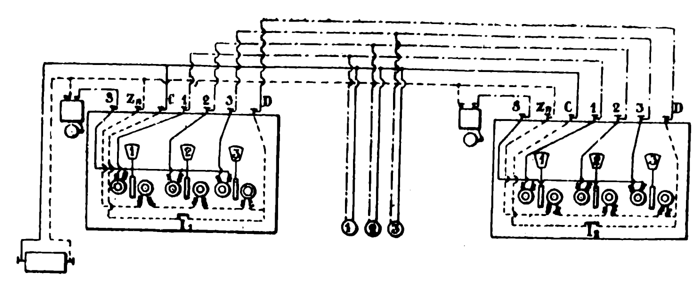


Fig. 25. — Funcionamiento simultáneo de dos cuadros indicadores con botones comunes de desaparición.

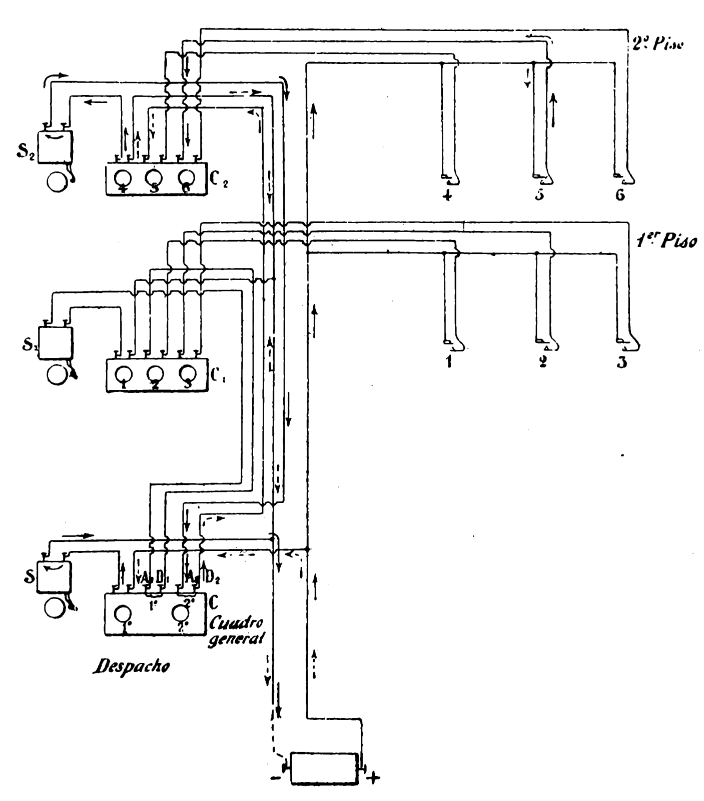


Fig. 26.

Instalación de cuadros indicadores en un hotel. – En cada piso hay un cuadro con tantos números como habitaciones tiene dicho piso: en el despacho del hotel hay otro cuadro con tantos números como pisos hay.

Es fácil ver, siguiendo las conexiones indicadas en el esquema de montaje (fig. 26) y refiriéndose a las conexiones interiores (figs. 24 y 25), que si se aprieta el botón núm. 5 del segundo piso, aparece este número en el cuadro de este piso; el timbre del despacho funciona en serie con el del piso y el número de éste aparece en el cuadro del despacho. Una vez en el piso de donde han llamado, se aprieta el botón de desaparición y el número correspondiente a este piso desaparece del cuadro del despacho.

Distinción, con un solo timbre y sin cuadro, entre las llamadas que provienen de tres sitios diferentes. — Se pueden distinguir dos llamadas, provenientes de los botones 1 y 2, intercalando en el hilo que sale de uno

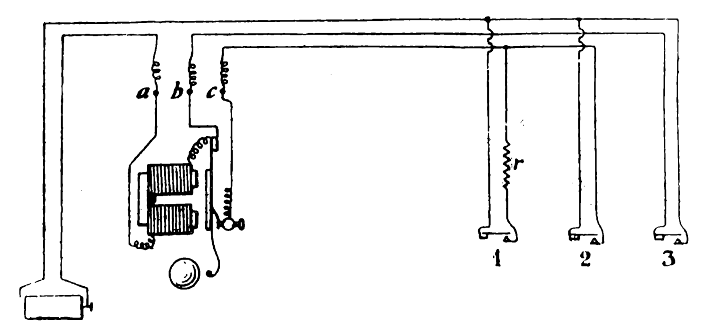


Fig. 27.

de ellos, del 1 por ejemplo, una resistencia conveniente que atenúa considerablemente la intensidad del sonido del timbre, con relación al que produce la llamada directa del botón 2. Agregando al timbre un tercer

borne *b* conectado como indica la figura 27, se obtiene al apretar el botón 3 un solo golpe sobre la campana.

Timbre polarizado. — Entre los núcleos de los electroimanes se coloca un imán permanente, prolongado hacia el exterior en una varilla de hierro dulce que puede oscilar alrededor de un eje *O* (fig. 28). Esta varilla tiene evidentemente la misma polaridad magnética que la del extremo del imán en que se apoya, y lleva en su parte superior un martillo que puede oscilar entre dos campanas. Cuando no funciona el aparato, el martillo se apoya sobre una de estas campanas; cuando pasan por los carretes corrientes alternas, las piezas polares de los electroimanes cambian de polaridad a cada cambio de sentido de la corriente; la pieza de hierro dulce es repelida por uno de los carretes y atraída por el otro, de manera que estas dos acciones se suman y cambian de sentido a cada alternación, resultando una oscilación del martillo entre las dos campanas.

Fig. 28.

Este timbre funciona con una magneto de corrientes alternas.

Bocina eléctrica. — A veces se sustituyen los timbres por trompetas (fig. 29).

Una palanca, móvil alrededor del eje *O*, está formada por un brazo *A*, armadura del electroimán *E*, y un brazo *B* que lleva un contacto *C*.

El brazo *B* está unido a una placa vibrante *V*. Cuando se unen los bornes *b* y *b'* a los polos de una pila, mediante un botón de llamada, se produce una serie continua de oscilaciones rápidas del brazo *B*, que se transmiten a la placa vibrante, lo cual produce un

sonido más o menos agudo. La corriente entra por el borne b, aislado de la masa, y sale por el borne b'.

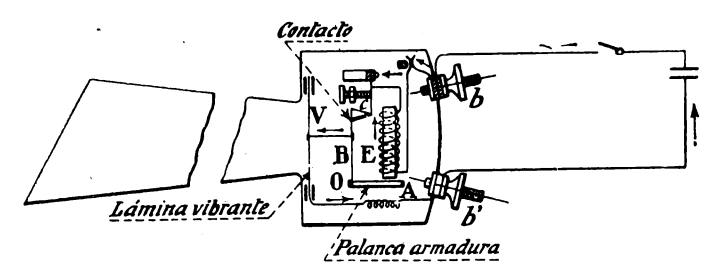


Fig 29.

Elección de timbre. — La elección de timbre está determinada, no sólo por el uso a que se destine y por su forma y dimensiones, sino también por la resistencia de su circuito de excitación.

Se construyen timbres de poca resistencia: 2 a 5 ohms, y timbres de gran resistencia: 50, 100 y 200 ohms.

Es fácil demostrar que la fuerza de atracción de la armadura, y por consiguiente la fuerza magnetomotriz o el número de amperes-vueltas, tienen un valor máximo cuando la resistencia de la línea es igual a la resistencia del timbre. En efecto; sea un carrete de dimensiones determinadas: diámetro exterior D, diámetro interior d, longitud l; este carrete está en un circuito de resistencia igual a r ohms; hay que determinar la resistencia del carrete de excitación para la cual el número de amperes-vueltas NI sea máximo (N es el número de espiras, I la corriente). Sea a el diámetro del hilo empleado (despreciando el espesor del aislador), n_1 el número de capas superpuestas y n_2 el

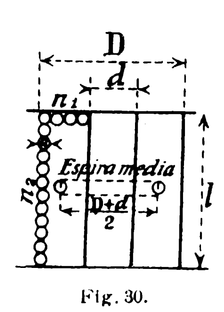


Fig. 30.

número de espiras que hay en cada capa. De la figura 30 se deduce:

$$n_1 a = \frac{D-d}{2}, \qquad n_2 a = l,$$

y siendo el número total de espiras $n_1 \times n_2$, se tiene:

$$n_1 n_2 a^2 = \frac{(D-d)}{2}\, l,$$

o sea:

$$Na^2 = \left(\frac{D-d}{2}\right) l. \qquad (1)$$

Además, se puede calcular la longitud total L del hilo arrollado, admitiendo que todas las espiras tienen la misma longitud que la espira de diámetro medio. Este diámetro medio es: $\frac{D+d}{2}$; la longitud de la espira correspondiente es: $\pi \times \frac{D+d}{2}$, y la longitud total de las N espiras será:

$$L = \pi \frac{D+d}{2} N.$$

La sección del hilo es $\pi \frac{a^2}{4}$, de modo que si la resistividad del cobre es k, la resistencia del carrete es:

$$R = k \frac{\pi \frac{D+d}{2} N}{\pi \frac{a^2}{4}}$$

o sea:

$$R = 2k(D+d) \frac{N}{a^2};$$

de donde:

$$d^2 = \frac{2k(D+d)N}{R}.$$

Sustituyendo en (1) a^2 por su valor, se tiene:

$$\frac{2k(D+d)}{R} N^2 = \left(\frac{D-d}{2}\right) l,$$

de donde:

$$N = \sqrt{\frac{(D-d)\,l}{4k(D+d)}} \times \sqrt{R}.$$

Si E es la fuerza electromotriz de la pila que alimenta el timbre, la corriente en el carrete es:

$$I = \frac{E}{R+r}$$

y el número de amperes-vueltas será:

$$NI = E\sqrt{\frac{(D-d)\,l}{4k(D+d)}} \cdot \frac{\sqrt{R}}{R+r}$$

Ahora bien, para un timbre de dimensiones determinadas y que funciona con una pila dada, los valores de E, D, d, k y l son constantes y el valor de $E\sqrt{\frac{(D-d)\,l}{4\,k\,(D+d)}}$ resulta también constante, pudiéndose representarlo por la letra A.

Por consiguiente, se tiene:

$$NI = A \cdot \frac{\sqrt{R}}{R+r}.$$

El número de amperes-vueltas será máximo cuando la expresión $\frac{\sqrt{R}}{R+r}$ sea un máximo, es decir, cuando:

$$\frac{R}{R+r} = \frac{1}{2},$$

o sea:

$$2R = R + r, \quad \text{es decir,} \quad R = r.$$

Es evidente que si la resistencia de la línea es muy grande, la corriente tendrá poca intensidad, y habrá

que compensar el pequeño número de amperes con un gran número de vueltas, utilizando un hilo fino, es decir, de gran resistencia.

Por consiguiente, se empleará un timbre de poca resistencia cuando tenga que funcionar con una pila local, y un timbre de resistencia tanto más grande cuanto mayor sea la longitud de la línea de llamada.

Observación. — Cuando la resistencia de la línea es grande, el número de espiras de los carretes del electroimán ha de ser también muy grande, y la autoinducción de estos carretes constituye un inconveniente para el buen funcionamiento del timbre. En este caso se debe emplear un relevador. Como norma puede admitirse que se impone el uso de un relevador cuando la resistencia de la línea es mayor de 200 ohms.

La determinación de la resistencia de los carretes de un relevador se hace por las mismas consideraciones que para la elección de un timbre.

Relevadores

Un relevador es un aparato utilizado para cerrar a distancia el circuito de un receptor sobre una pila local cuando la corriente que recorre la línea no basta para accionar directamente este receptor.

Está constituído, en general, por un electroimán cuyas espiras de excitación están dispuestas en la línea y construído de tal modo que por pequeña que sea la corriente que lo recorra, atraiga a su armadura, que cierra mediante un contacto la pila local sobre el circuito que comprende los receptores.

Por ejemplo, se emplea un relevador para hacer funcionar un timbre a gran distancia; en este caso, el circuito por donde circula la corriente está formado por un hilo de hierro galvanizado y la tierra; este

circuito es muy resistente y la corriente que lo recorre muy pequeña en general (fig. 31).

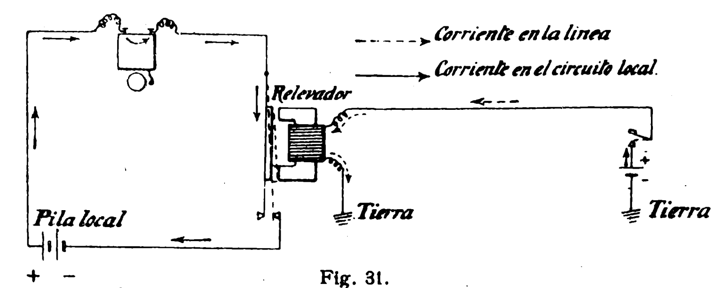


Fig. 31.

Relevador polarizado. — La armadura está polarizada y consiste en un imán permanente, que se mueve en un sentido o en otro, según el sentido de la corriente que pasa por el carrete del electroimán.

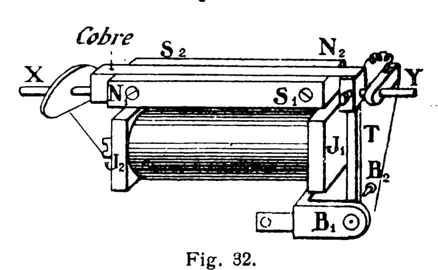


Fig. 32.

Entre los muchos relevadores polarizados, uno de

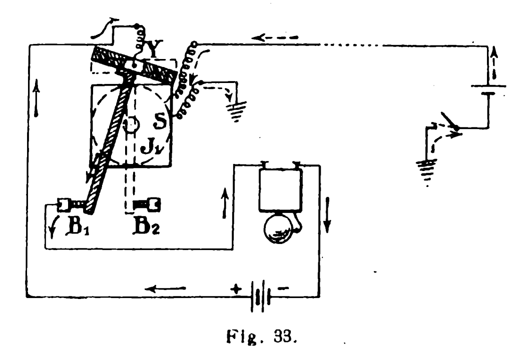


Fig. 33.

los más empleados en telefonía es el de Sieur (figuras 32 y 33).

El electroimán está formado por un carrete cuyas bases J_1 y J_2 constituyen los dos polos; la armadura está compuesta de dos imanes rectos N_1S_1, N_2S_2, cuyos polos de nombres contrarios están enfrente, separados por dos piezas de cobre. El conjunto puede oscilar alrededor de un eje XY paralelo a la dirección de los imanes y en uno de sus extremos hay fijada una varilla metálica T que puede ponerse en contacto con uno de los tornillos o botadores B_1 y B_2 según que el sistema de los imanes oscile en uno o en otro sentido Si se envía al carrete una corriente de sentido tal que sobre la base J_1 se produzca un polo sur y por consiguiente sobre la J_2 un polo norte, el sistema de los imanes oscila y el timbre queda cerrado sobre la pila local por el botador B_1. Si se envía una corriente en sentido inverso, la varilla T se apoya sobre el botador B_2 y el circuito queda cortado.

Relevador con llamada por inversión de corriente. — En este tipo de relevador, la armadura, también polarizada, toca en uno de los botadores cuando la corriente pasa por un electroimán en un cierto sentido, y en el otro botador cuando la corriente circula en sentido inverso.

Se pueden emplear estos relevadores para cerrar o abrir a distancia un circuito local o para accionar dos aparatos montados en una misma línea.

Sean, por ejemplo, dos estaciones I y II, cuyos carretes E_1 y E_2 están intercalados en una misma línea, de modo que sus devanados sean de sentido contrario (fig. 34). Supongamos que las láminas del inversor I de la estación de llamada estén sobre los contactos a y b; cuando se cierra el interruptor i, pasa una corriente por los carretes de los dos relevadores, desarrollando en ellos los polos n_1s_1 y n_2s_2. Las lámi-

nas móviles alrededor de los ejes o_1 y o_2, fijadas sobre los polos norte de los dos imanes permanentes A_1 y A_2, están también imanadas; por consiguiente, estarán solicitadas en sentido inverso una de la otra, de modo

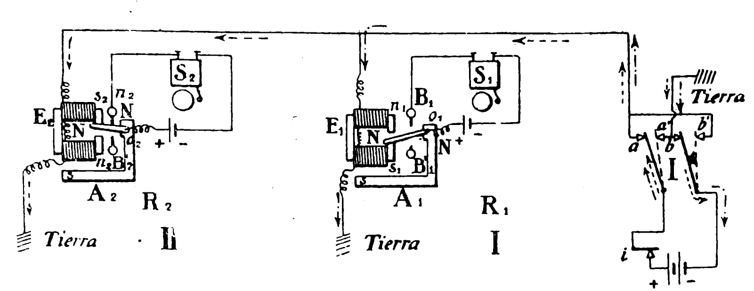


Fig. 34.

que el circuito local de una de las estaciones (de la estación II en el caso de la figura) se encuentra cerrado, mientras que el circuito de la otra estación está abierto. Si se invierte el sentido de la corriente poniendo las láminas del inversor *I* sobre los contactos *a'* y *b'*, sonará únicamente el timbre S_1 de la estación I.

CAPÍTULO II

Telefonía

Principio. Órganos esenciales

Una instalación eléctrica que establezca entre dos estaciones *A* y *B* una comunicación telefónica está esencialmente constituída por un *transmisor* y un *receptor* en cada estación, unidos entre sí por una *línea* conductora.

El órgano esencial del transmisor es el *micrófono*. Un micrófono está generalmente formado por esferitas de carbón comprendidas entre dos placas conductoras; el conjunto forma una especie de cubeta en la que los gránulos de carbón pueden moverse libremente, pero siempre en contacto con los discos o placas (figura 35).

Fig. 35.

El receptor o *teléfono* está formado por un imán permanente cuyas prolongaciones polares están cubiertas por dos pequeños carretes de hilo fino; los planos de las espiras de estos carretes son perpendiculares a los ejes de los polos. Delante de los polos hay colocada una *membrana,* placa muy delgada de palastro fija por sus bordes y que ocupa el fondo de una embocadura de ebonita.

La *línea* está formada por un hilo de cobre que une los extremos del hilo de los dos carretes (montados en serie) del teléfono de una estación, con los dos discos de carbón del micrófono de la otra. Una pila está intercalada en la línea en una de las estaciones.

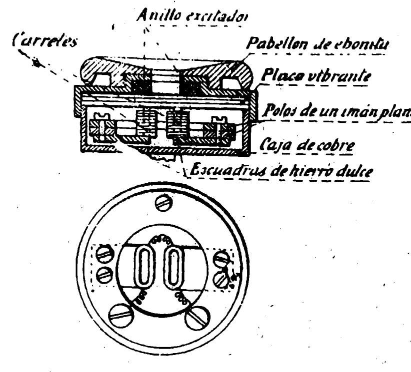


Fig. 36.

Funcionamiento. — El circuito (figura 37), que comprende la línea, los carretes del teléfono de una estación, el micrófono de la otra estación y la pila, puede considerarse dividido en dos partes: una, de resistencia *invariable R*, formada por las resistencias de la línea, de los carretes del teléfono, de los carbones del micrófono y de la pila; la otra, de resistencia *variable r* que es la resistencia que presentan los contactos imperfectos entre los gránulos y los discos del micrófono. Por consiguiente, si E es la fuerza electromotriz de la pila, la corriente en la línea y en los carretes del teléfono tiene por valor:

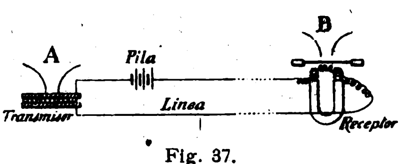


Fig. 37.

$$i = \frac{E}{R + r}.$$

Cuando se habia delante del micrófono, los gránulos de carbón vibran y sus movimientos modifican el valor de la resistencia en los contactos r. Estas varia-

ciones de r se traducen en variaciones de la corriente i en los carretes, y por consiguiente del campo magnético que producen. La imanación del imán permanente del teléfono, y por consiguiente de la membrana de palastro, se encuentra evidentemente modificada a consecuencia de las vibraciones de los gránulos del micrófono Estas modificaciones de imanación se traducen en vibraciones de la placa, que se transmiten por el aire, reproduciendo así el sonido emitido delante del micrófono.

Las instalaciones efectuadas con arreglo a este esquema reciben el nombre de instalaciones «con circuito primario». No son susceptibles de un gran alcance. En efecto, supongamos que la resistencia en los contactos varía del valor r_1 al valor r_2; la corriente en los carretes del receptor variará de

$$i_1 = \frac{E}{R + r_1} \quad \text{a} \quad i_2 = \frac{E}{R + r_2}.$$

Luego la variación de la corriente es:

$$i_1 - i_2 = \frac{E}{R + r_1} - \frac{E}{R + r_2} = \frac{E(r_2 - r_1)}{(R + r_1)(R + r_2)}.$$

Si la línea tiene una gran longitud, la resistencia en los contactos es muy pequeña y despreciable comparada con la resistencia constante R, y se tiene:

$$i_1 - i_2 = \frac{E}{R_2}(r_2 - r_1).$$

Por consiguiente, para una variación dada de la resistencia en los contactos, la variación de la corriente es inversamente proporcional al cuadrado de la resistencia de la línea, es decir, tanto menor cuanto mayor sea su longitud.

Se podría aumentar el alcance aumentando sufi-

cientemente la fuerza electromotriz E de la pila; pero entonces se producen chispas en los puntos de contacto, las variaciones de la corriente resultan poco limpias, y un ruido vago, conocido con el nombre de ruido de fritura, entorpece y dificulta la conversación.

El dispositivo siguiente, debido a Edison, y llamado «de circuito secundario», ha permitido salvar esta dificultad.

La pila de la estación transmisora está cerrada sobre un circuito que comprende el micrófono y el primario de hilo grueso de un pequeño transformador; los extremos del circuito secundario de este transformador están unidos a la línea (fig. 38). En estas con-

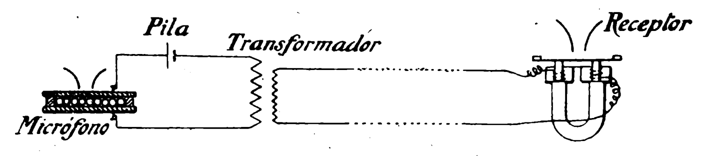


Fig. 38.

diciones, la resistencia fija del circuito por donde pasa la corriente producida por la pila es pequeña y la resistencia variable de los contactos es considerable comparada con ella. Las variaciones de la resistencia en los contactos, producidas por las vibraciones del aire, se traducen en variaciones de la corriente en el primario del transformador, resultando variaciones considerables de tensión en los bornes del secundario y por consiguiente de la corriente en el teléfono de la estación receptora. Además, la tensión en el principio de la línea está elevada porque el número de espiras del circuito secundario del transformador es mayor que el del primario.

Mediante este dispositivo, y empleando aparatos de transmisión y de recepción sensibles, se pueden

establecer comunicaciones telefónicas entre dos estaciones muy alejadas entre sí.

Diferentes tipos de micrófonos. — Según el principio de su funcionamiento, los micrófonos pueden clasificarse en cuatro categorías: 1.ª, micrófonos de variación de resistencia; 2.ª, micrófonos electromagnéticos; 3.ª, micrófonos electrodinámicos, y 4.ª, micrófonos electrostáticos.

Los modelos magnéticos, dinámicos y estáticos permiten obtener una transmisión muy fiel, pero son frágiles y caros, motivo por el cual su empleo se limita, en general, a la radiodifusión y al registro de discos y películas.

En cambio, el modelo de resistencia variable es sencillo y barato; es el único que se emplea en telefonía ordinaria. Las cualidades que se ha procurado darle son: fidelidad y sensibilidad.

Sin embargo, esta última no debe ser exagerada porque el aparato resulta entonces demasiado sensible a los efectos perturbadores que pueden producirse en las líneas, a los defectos, por pequeños que sean, de regulación, a las posiciones defectuosas del micrófono, etc. Para conseguir los resultados citados, es preciso realizar las condiciones siguientes:

1.ª *Multiplicar los puntos de contacto*. Por esta razón, los antiguos transmisores de barras de carbón han sido completamente abandonados y sustituídos por los transmisores de polvo o de gránulos;

2.ª *Evitar los acuñamientos* que pueden ocurrir entre los granos a consecuencia de la dilatación producida por el calentamiento debido al paso de la corriente;

3.ª *Construir las cajas impermeables,* porque el vapor de agua que hay en el local donde está el aparato

y el proyectado contra la caja mientras se habla, entra en el interior y se condensa sobre los granos de carbón, que se aglomeran parcialmente;

4.ª *Obtener superficies de contacto inoxidables,* porque la oxidación de estas superficies aumentaría considerablemente la resistencia del micrófono. Por esta razón la única sustancia empleada para los contactos es el carbón;

5.ª *Evitar las resonancias:* este defecto puede ser debido a un mal ajuste de la placa vibrante, a una forma defectuosa de la caja, a dimensiones mal proporcionadas, etc.;

6.ª *Ajustarse a las reglas de la higiene.* Con este objeto se han adoptado los aparatos que obligan a tener la boca separada del transmisor durante la conversación.

Los muchos modelos de transmisores difieren entre sí esencialmente por la forma y las dimensiones del carbón empleado y por la forma de las cubetas en que se coloca el carbón.

El carbón se emplea en las diferentes formas siguientes:

1.ª Granos irregulares de carbón machacado y ligeramente tamizados;

2.ª Granos esféricos de carbón moldeado;

3.ª Granos esféricos de grafito moldeado;

4.ª Polvo de grafito.

Las cubetas que constituyen el fondo de los micrófonos son: de fondos planos, acanaladas o con alvéolos.

Las figuras siguientes permiten darse cuenta de la construcción de algunos modelos de micrófono y comprender fácilmente cómo puede construirse otro cualquiera.

a) Cubeta de fondo plano y granos esféricos de carbón moldeado. — ***Micrófono Berthon*** (fig. 39).

b) CUBETA ACANALADA Y GRANOS IRREGULARES. — *Micrófono Mildé* (figura 40). — *Micrófono Bailleux* (figura 41). — Este último está construído como el micrófono Berthon, pero la membrana de carbón posterior está sustituída por un disco de metal plateado con ranuras circulares y el carbón moldeado por partículas de antracita machacada.

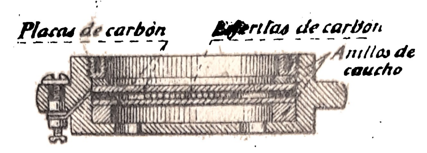
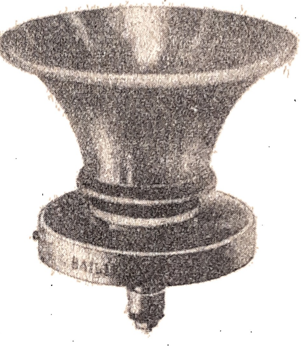


Fig. 39.



Fig. 40.


Fig. 41.

c) CUBETA DE FONDO ESTRIADO Y GRÁNULOS DE GRAFITO MOLDEADO. —*Micrófono Berliner* (fig. 42).

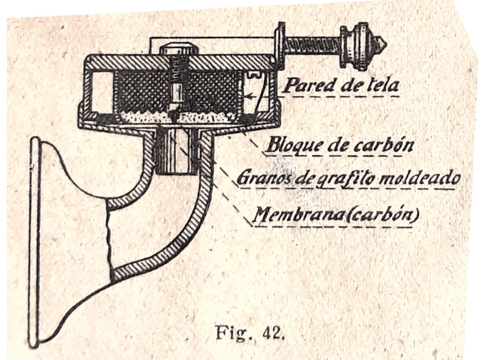
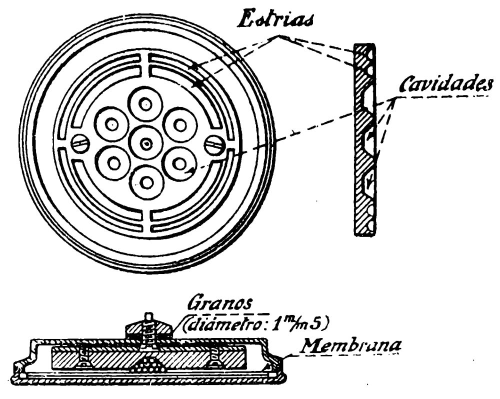


Fig. 42.

d) CUBETA DE ALVÉOLOS Y ESTRÍAS, Y GRÁNULOS DE CARBÓN MOLDEADO (figuras 43 y 44). — *Cápsula microfónica Ach. Marty (tipo de la Administración francesa, modelo 1910).*

e) CUBETA CON FONDO PLANO Y POLVO DE GRAFITO. — *Micrófono Solid-Back* (fig. 45).



Figs. 43 y 44.

La corriente pasa por el perno, una de las pastillas de carbón atraviesa el polvo de grafito más o menos

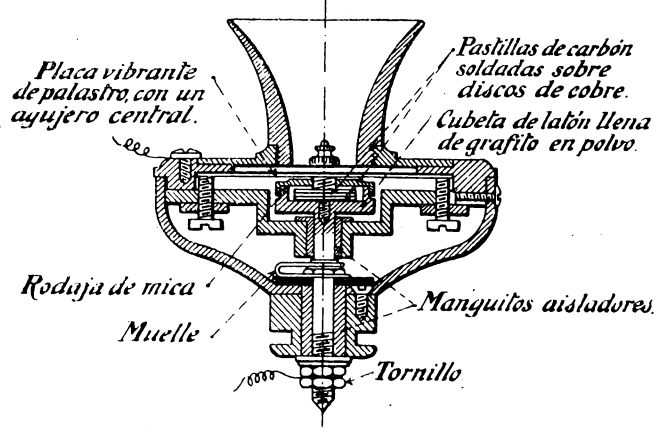


Fig. 45.

comprimido por la placa vibrante y vuelve a la pila por la otra pastilla, la lámina vibrante y la masa de la caja.

Este micrófono es de gran sensibilidad; con él puede hablarse sin alzar la voz y es adoptado generalmente en las centrales telefónicas.

Diferentes tipos de receptores. — Los receptores pueden ser electromagnéticos (es el caso del modelo

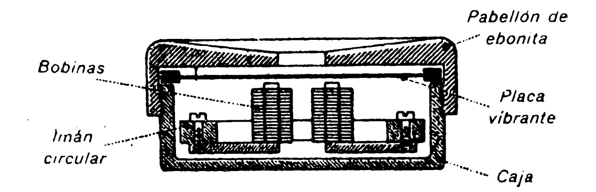


Fig. 46.

descrito en la página 23 y representado por la figura 46), electrodinámicos o electrostáticos.

En telefonía ordinaria sólo se utiliza el receptor electromagnético, que es el más sencillo de todos.

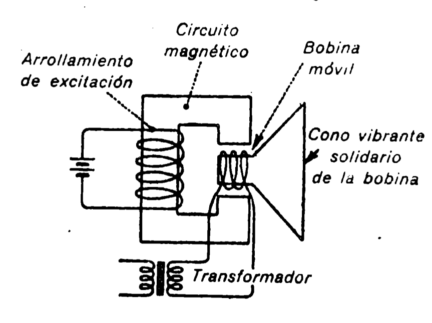


Fig. 47.

Sin embargo, hay casos en que es necesario transmitir las comunicaciones telefónicas con altavoz (discursos al aire libre, mitines, estaciones de ferrocarril, etc.). Un receptor electromagnético quedaría entonces rápidamente saturado y ello sería causa de importantes deformaciones. En este caso se utiliza un altavoz electrodinámico.

Su principio es el siguiente: una bobina, muy ligera y solidaria de una membrana cónica, de cartón delgado, está suspendida en el campo de un potente electro-

imán (fig. 47); cuando se le envía la corriente telefónica, esta bobina móvil queda sometida a la acción de una fuerza (véase el tomo I, Generalidades, páginas 169 y siguientes) que varía según la intensidad de la corriente. Entonces entra en vibración y arrastra la membrana cónica reproduciendo fielmente el sonido inicial.

A estos altavoces puede exigírseles un gran volumen sonoro sin deformaciones. En cambio son poco sensibles y necesitan un manantial de corriente continua para la excitación del electroimán.

Problemas telefónicos diversos

Los diversos problemas que pueden tener que resolverse en telefonía, así como las soluciones que pueden dárseles, están resumidos en el siguiente estado:

- I. Comunicación simple entre dos estaciones.
  - 1.º Circuito primario.
    - a) Dos baterías de pilas.
    - b) Una sola batería de pilas.
  - 2.º Circuito secundario.
    - a) Llamada por pilas.
    - b) Llamada por magneto.
- II. Comunicación entre una estación cualquiera y una central (sin intercomunicación).
  - 1.º Circuito primario
    - con o sin reciprocidad de llamadas;
    - con o sin discriminación de llamadas.
  - 2.º Circuito secundario.
- III. Intercomunicaciones directas entre dos estaciones cualesquiera.
  - 1.º Aparatos exclusivamente particulares.
  - 2.º Aparatos mixtos.

IV. Intercomunicación entre dos estaciones cualesquiera por intermedio de un standard.	1.° Manual.	a) Batería local o magneto. b) Batería central.
	2.° Automático.	

Una estación telefónica comprende el conjunto de órganos que permiten realizar las siguientes operaciones:

1.ª Llamar a otra estación con la cual se desea entrar en comunicación;

2.ª Ser llamada por otra estación;

3.ª Mantener una conversación con la estación llamada.

I. Comunicación simple entre dos estaciones

1.° Circuito primario

Una estación telefónica de circuito primario comprende:

I. Una caja que contiene los siguientes órganos: 1.°, un micrófono *M*; 2.°, un gancho conmutador *C*; 3.°, una llave de llamada *A*;

II. Un receptor *R* o dos receptores en serie o en paralelo, uno de los cuales debe estar colgado del gancho de conmutación cuando la estación no está comunicando;

III. Un timbre de llamada *S*;

IV. Una pila de varios elementos *P*.

a) **Instalación con pilas en todas las estaciones.** — Las conexiones entre estas diferentes partes se establecen del modo indicado en el esquema de la figura 48,

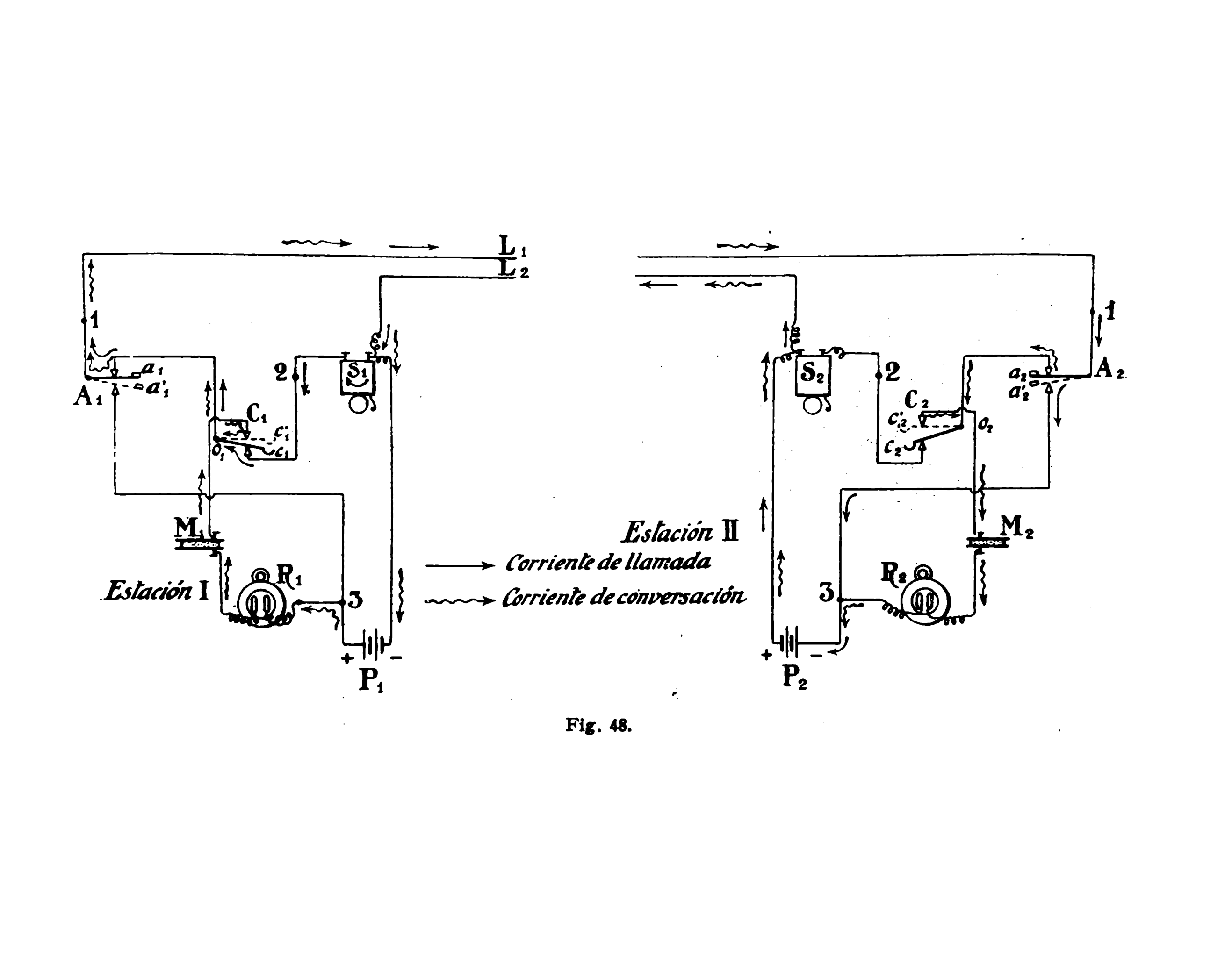

L1
L2
1
A1
a1
a'1
C1
c'1
c1
o1
2
S1
M1
R1
3
P1
Estación I
Estación II
Corriente de llamada
Corriente de conversación
S2
2
C2
c'2
c2
o2
1
A2
a2
a'2
M2
R2
3
P2

Fig. 48.

que representa dos estaciones I y II unidas entre sí por las líneas L_1 y L_2.

Supongamos, por ejemplo, que la estación II quiere llamar a la estación I. La llave de llamada está en la posición A_1a_1 y su conmutador en la posición O_1C_1 (receptor colgado); el conmutador de la estación II está en la posición O_2C_2 (receptor colgado), y para la llamada se cierra la llave A_2 que toma la posición $A_2a'_2$. Una corriente sale del polo + de la pila P_2, atraviesa la línea L_2, el timbre S_1 de la estación I, la llave A_1, la línea L_1 y vuelve al polo — de la pila P_2 por la llave $A_2a'_2$.

Las personas que quieren hablar descuelgan entonces los respectivos receptores para acercarlos al oído, y los conmutadores C_1 y C_2 toman respectivamente las posiciones $O_1C'_1$ y $O_2C'_2$; las pilas P_1 y P_2 están entonces montadas y cerradas en serie en un circuito que comprende la línea L_2, el receptor R_1, el micrófono M_1, el conmutador $O_1C'_1$, la llave A_1a_1, la línea L_1, y en la estación II, la llave A_2, el conmutador $O_2C'_2$, el micrófono M_2 y el receptor R_2.

OBSERVACIÓN I. — En el esquema anterior se ve que la caja de cada estación tiene tres bornes exteriores: el borne 1, unido por dentro de la caja al eje de la llave de llamada y por fuera a uno de los hilos de línea; el borne 2, unido en el interior al contacto sobre el cual

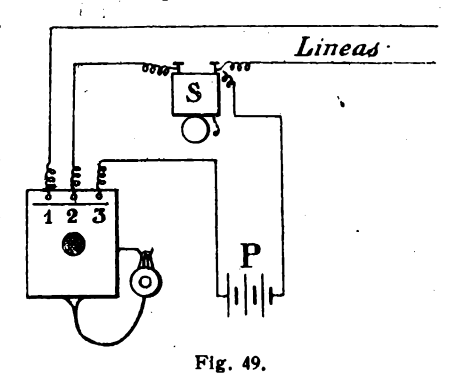


Fig. 49.

se apoya el conmutador C cuando el receptor está col-

gado, y en el exterior a uno de los bornes del timbre, a cuyo otro borne se conectan el segundo hilo de línea y uno de los polos de la pila; el borne 3 está unido por dentro a uno de los extremos de los carretes del receptor y por fuera al otro polo de la pila (fig. 49).

OBSERVACIÓN II. — Las pilas P_1 y P_2 están montadas en serie en el circuito de los micrófonos y de los receptores de las dos estaciones. Por consiguiente, si en una de las estaciones se ha unido el polo + al timbre y el polo — al borne 3, habrá que unir en la otra estación el polo + con el borne 3 y el polo — con el timbre.

OBSERVACIÓN III. — Puede suceder que los bornes 1, 2 y 3 no estén indicados en la caja, o señalados de modo diferente y de distinta manera dispuestos. Para conocerlos se abre la caja y se siguen las conexiones o se procede de la manera siguiente:

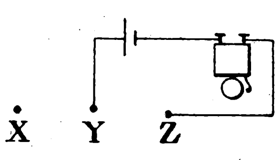


Fig. 50.

Sean *X*, *Y*, *Z* los tres bornes del aparato (fig. 50). Se busca, por tanteos, entre cuáles de estos tres bornes es preciso conectar un timbre intercalado en el circuito de una

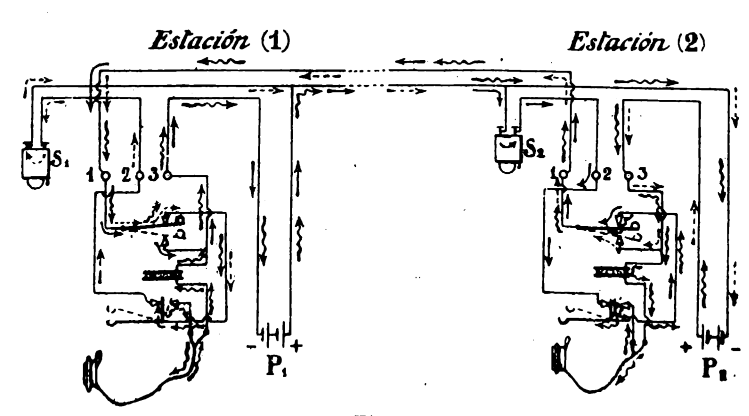


Fig. 51.

pila para que este timbre funcione cuando estando colgado el receptor no se cierre la llave de llamada. Supongamos que esto sucede al ensayar los bornes *Y* y *Z*; se ve fácilmente que uno de estos bornes es el 1 y el otro el 2. Se busca a continuación entre qué bornes funciona la pila cuando estando colgado el receptor se cierra la llave de llamada; sean *X* e *Y* estos dos bornes; uno de ellos es el 1 y el otro el 3. De estas dos pruebas resulta que el borne 1 es el *Y*, el borne 2 el *Z* y el 3 el *X*.

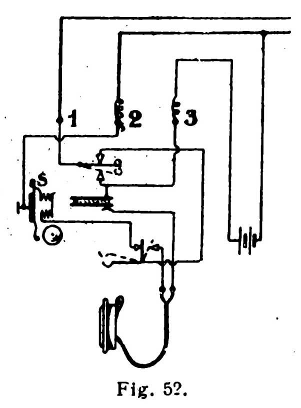


Fig. 52.

El esquema de la figura 51 representa la marcha de las corrientes de llamada y de conversación en las dos estaciones.

Observación IV. — En algunos modelos el timbre está dentro de la caja; las conexiones interiores están establecidas en estos casos del modo indicado en la figura 52.


Fig. 53.

Aparatos combinados. — Son aparatos en que el transmisor microfónico *M* y el receptor telefónico *R* están dispuestos de tal manera que cuando se acerca el receptor al oído queda el micrófono delante de la boca (fig. 53). En esta clase de aparatos la caja sólo contiene la llave o botón

de llamada y el gancho conmutador; las conexiones son las indicadas en el esquema de la figura 54, que son idénticas, como fácilmente se ve, a las establecidas dentro de la caja en las estaciones de micrófono fijo.

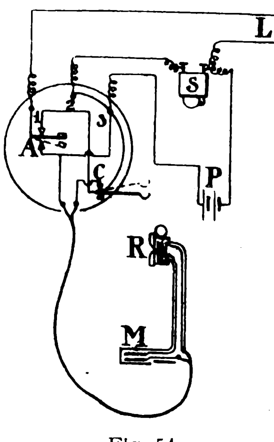


Fig. 54.

b) **Instalación con una pila de varios elementos en una sola de las estaciones.** — Esta instalación necesita tres hilos de línea, lo cual no es un gran inconveniente si la distancia entre las estaciones es pequeña. La pila se divide en dos grupos, cada uno de los cuales sirve para las llamadas de una u otra estación, y los dos juntos se utilizan para la corriente de conversación a través de los micrófonos y receptores.

El montaje es el representado en la figura 55, en la que pueden seguirse las corrientes de llamada (flechas de trazo lleno y de puntos) y de conversación (flecha sinuosa) y darse cuenta del funcionamiento completo.

Puede evitarse la división de la pila, pero entonces el montaje y las conexiones interiores de las dos estaciones no son idénticos, según puede verse en la figura 56.

Sin embargo, se pueden emplear dos estaciones idénticas con una pila en una de las estaciones, utilizando aparatos con cuatro bornes, siendo el montaje el representado por las figuras 57 y 58.

Observación. — En general, los timbres de llamada necesitan una corriente de más intensidad que la que debe pasar por los micrófonos y receptores; es ventajoso, por consiguiente, hacer funcionar los timbres de

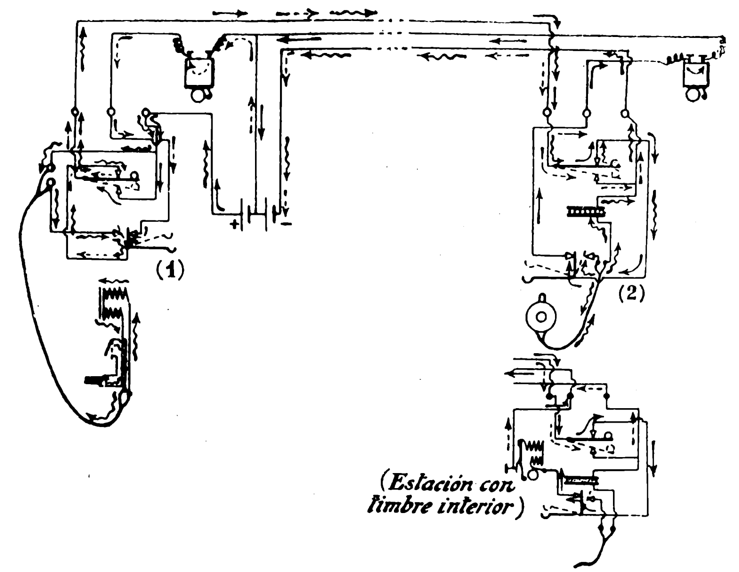


Fig. 55.

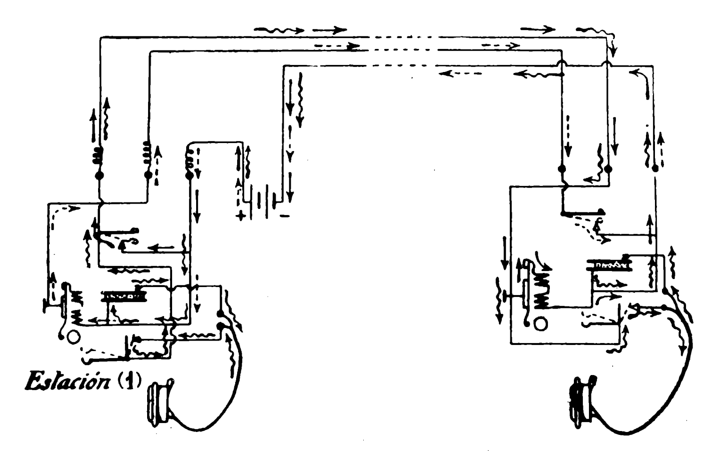


Fig. 56.

llamada con un número mayor de elementos de pila que para las conversaciones. Esto se consigue con el montaje indicado esquemáticamente en la figura 58

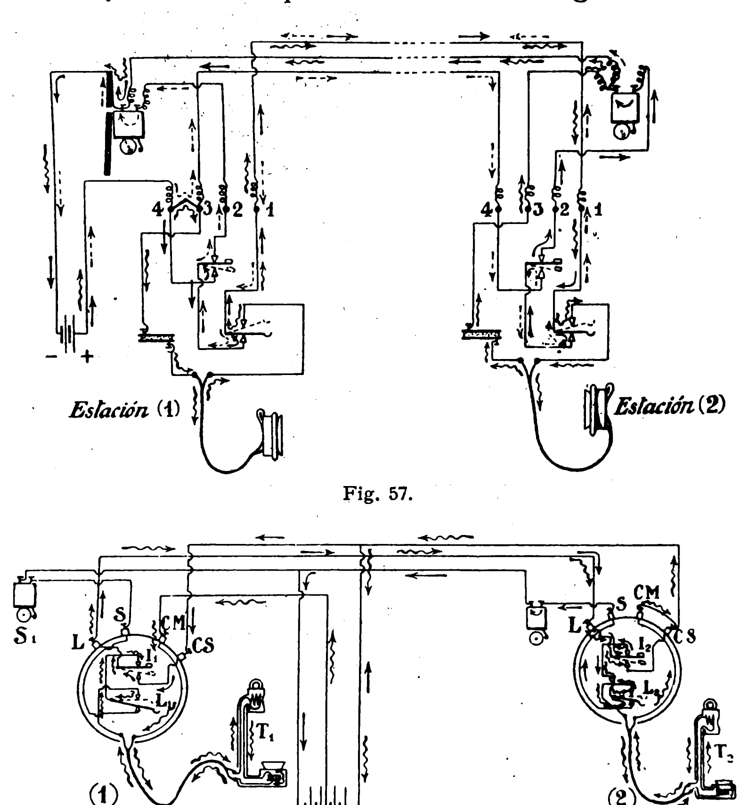


Fig. 57.

Fig. 58.

Botones-teléfonos. — Son aparatos sencillos que pueden emplearse en circuitos de timbres. El botón ordinario de llamada está sustituído por el botón-teléfono, al cual puede unirse, por una toma de corriente, un aparato combinado, en cuya empuñadura hay una

palanca que debe apretarse durante la conversación (figura 59). Al timbre se añade un botón de tres bornes (fig. 60).

Las conexiones interiores de cada botón y la relación

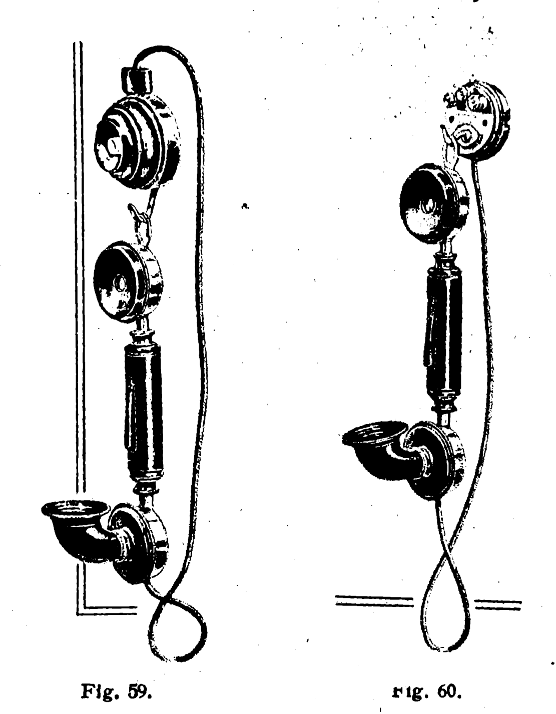


Fig. 59. Fig. 60.

de ellos entre sí están representadas por los esquemas de las figuras 61 y 62.

Se ve fácilmente (fig. 63) que puede llamarse a la estación agregada al timbre, desde diferentes puntos, por medio de varios botones-teléfonos dispuestos en derivación sobre los dos hilos de línea.

Si se quiere que dos de estas estaciones puedan unirse de modo que sean posibles las llamadas recíprocas, será preciso otro hilo de línea y agregar a la

estación *C* un botón de timbre *B* y a la estación 1 un timbre (fig. 64).

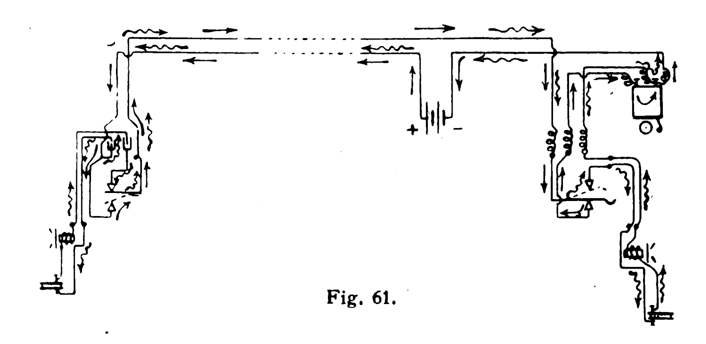


Fig. 61.

Por último, en la estación *C* se pueden distinguir los puntos de donde provienen las llamadas por medio de un cuadro indicador (fig. 65).

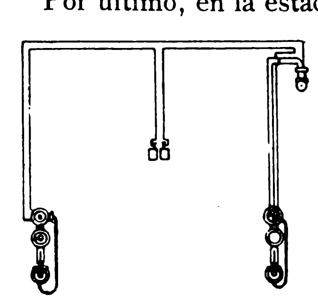


Fig. 62.

2.° Circuito secundario

Llamada por pilas.—Una estación telefónica de circuito secundario comprende:

I. Una caja que contiene los siguientes órganos: 1.°, un micrófono *M*; 2.°, una llave de llamada *A*; 3.°, un gancho conmutador *C*; 4.°, un carrete de inducción *B*;

II. Un receptor o dos receptores en serie o en paralelo, uno de los cuales debe estar suspendido del gancho conmutador cuando la estación no está comunicando;

III. Un timbre *S*;

IV. Una pila de varios elementos, *P*, para la llamada;

V. Una pila, cerrada durante la conversación,

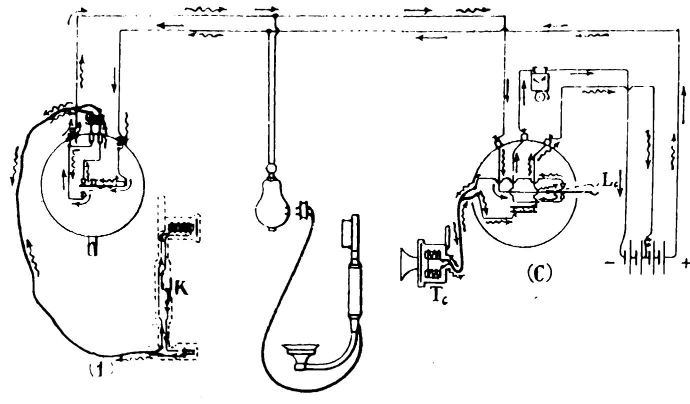


Fig. 63.

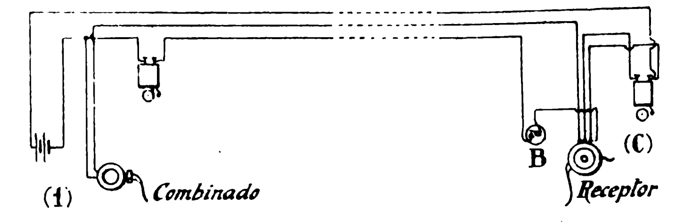


Fig. 64.

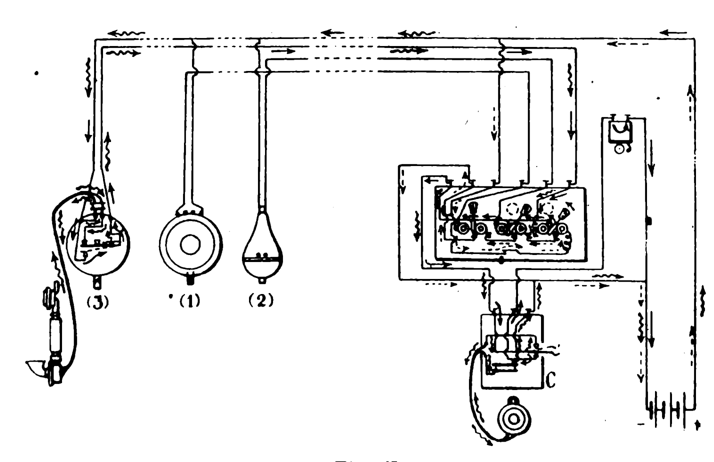


Fig. 65.

sobre el micrófono y el hilo grueso o circuito primario del carrete B.

Las conexiones se establecen del modo indicado por el esquema de la figura 66, que representa dos estaciones I y II unidas entre sí por las líneas L_1 y L_2.

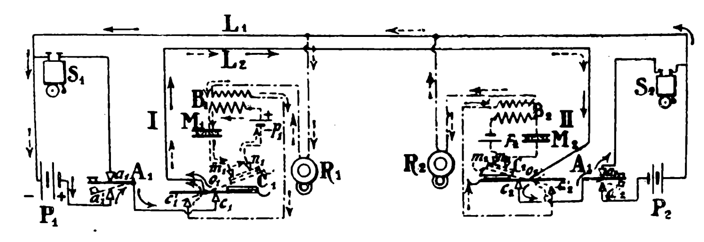


Fig. 66.

Supongamos, por ejemplo, que la estación I quiera llamar a la estación II; se apoya en I la lámina de la llave A_1 sobre el contacto a'_1; la corriente que sale del polo + de la pila P_1 pasa por el *contacto-timbre* c_1 del gancho conmutador C_1, por el eje O_1 y llega por la línea L_2 al eje O_2 del gancho conmutador C_2 de la estación II; pasa por el *contacto-timbre* c_2, por el timbre S_2 mediante la lámina de la llave de llamada A_2, que no está cerrada, y por último al polo − de P_1 por la línea L_1.

Las dos estaciones descuelgan sus receptores, y los ganchos conmutadores suben apoyándose sobre los *contactos de conversación* c'_1 y c'_2; además, una lámina l aislada del conmutador pone en comunicación los dos contactos m_1 y n_1 para la estación I y m_2 y n_2 para la estación II, con lo cual se cierran directamente las pilas p_1 y p_2 sobre los micrófonos y circuitos primarios de los dos carretes B_1 y B_2.

Si se habla delante de M_1, por ejemplo, circula una corriente de intensidad variable por el hilo grueso de B_2, produciéndose fuerzas electromotrices alternas

en el hilo fino de este carrete. Una corriente sale de uno de los extremos de este hilo fino y recorre la línea L_2, llega al eje O_2 de C_2, pasa al contacto de conversación c'_2, al circuito secundario de B_2, atraviesa el receptor R_2, y después, por la línea L_1, el receptor R_1

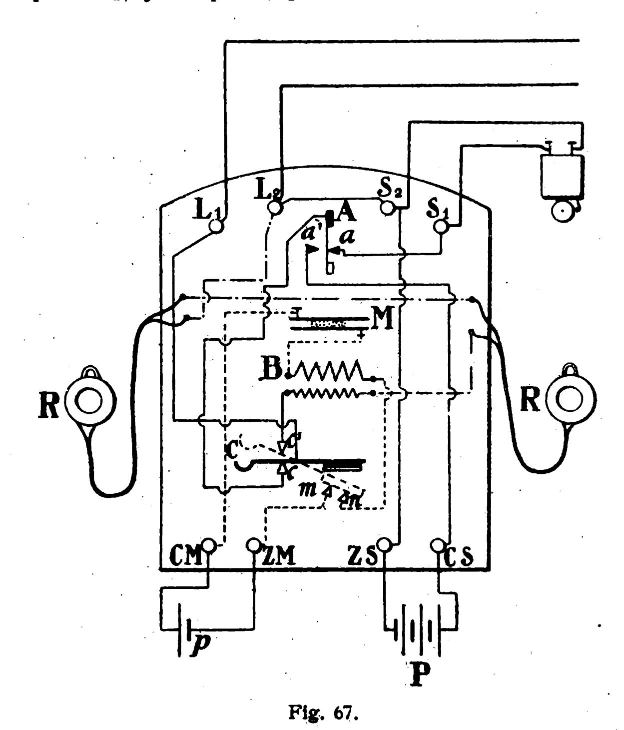


Fig. 67.

de la estación I, volviendo al otro extremo del circuito secundario del carrete B_1.

Hay muchos modelos hechos por diferentes constructores: la única diferencia que hay entre estos modelos consiste en las posiciones relativas de sus diversos órganos y en sus formas, pero su constitución esencial es la indicada en el esquema de la figura anterior.

En general, estas estaciones tienen ocho bornes: dos bornes L_1, L_2, unidos por fuera a los hilos de línea; otros dos, S_1, S_2, unidos al timbre; dos a los polos de la pila-timbre *CS* y *ZS*, y por último otros dos, unidos a la pila-micrófono *ZM*, *CM*. La figura 67 da la disposición de los órganos y de los bornes adoptada en la estación de Ader. Siguiendo las conexiones, se ve fácilmente que:

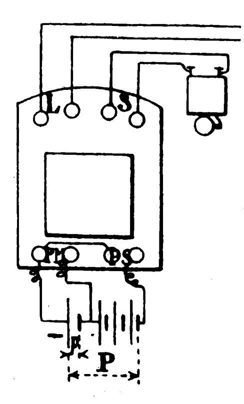
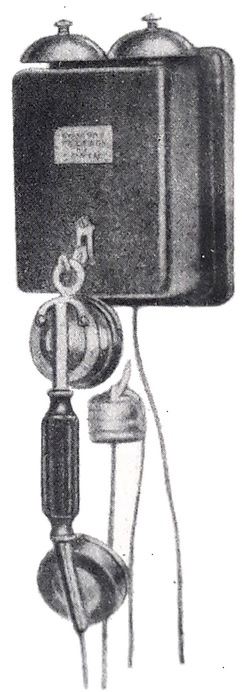


Fig. 68.

1.° *Estando colgado el receptor y sin cerrar la llave de llamada* (posición para recibir una llamada), el borne L_1 está unido a S_1 por el *contacto-timbre c* del gancho conmutador y el contacto *a* de la llave de llamada; el borne L_2 está unido directamente a S_2. Todos los demás circuitos están abiertos;

2.° *Estando colgado el receptor y cerrada la llave de llamada* (llamada), el polo + de la pila-timbre (*CS*) está unido por el contacto *a'* de la llave de llamada y el contacto-timbre *c* del gancho conmutador a la línea L_1; el polo — de la pila (*ZS*) está unido a la otra línea L_2;


Fig. 69.
Estación mural simple, con timbre solidario.

3.° *Estando descolgado el receptor y abierta la llave de llamada* (conversación), el circuito local,

micrófono y primario del carrete, está cerrado sobre la pila *p* por los bornes *CM* y *ZM*; además, uno de los extremos del secundario del carrete está unido al borne L_1 por los receptores, y el otro al borne L_2 por el *contacto de conversación c'* del gancho conmutador.

Estas observaciones permiten seguir fácilmente las diferentes corrientes de llamada y de conversación dentro de las estaciones, descubriéndose así los bornes que

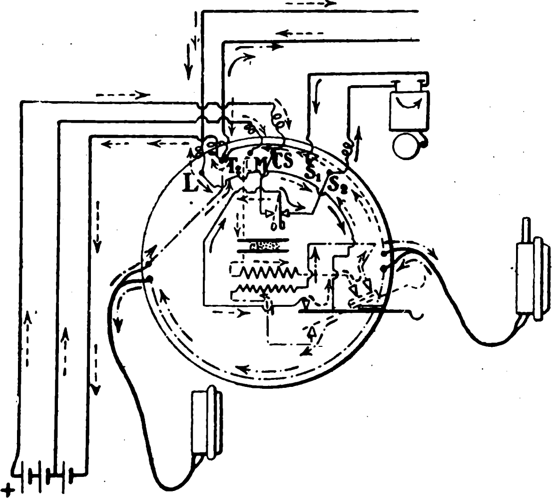


Fig. 70.

hemos designado con las letras L_1, L_2; S_1, S_2; *ZS*, *CS*; *ZM*, *CM*, en una estación en que estuvieran señalados de otro modo, y por último, pudiéndose descubrir una rotura o un defecto ocurrido en el interior de la estación.

Observaciones. — 1.ª Pueden disponerse las pilas *p* y *P* en un solo grupo, utilizando todo éste para la corriente de llamada, y una parte (uno o dos elementos) para el micrófono (fig. 68).

2.ª En algunas estaciones, el número de bornes se reduce a seis; en efecto, el borne L_2 está conectado

directamente con el borne ZS, uniéndose en el exterior el polo — de la pila total con el borne L_2, que se designa ordinariamente con el nombre de tierra-zinc, TZ (tierra, porque la línea L_2 que parte del polo — de la pila se sustituye a veces por la tierra, y zinc porque la pila empleada generalmente es del tipo Leclanché, siendo su polo negativo una barra de zinc); además, el circuito-micrófono está cerrado cuando el gancho conmutador está arriba, entre los dos bornes CM y TZ. Las conexiones son las indicadas por la figura 70.

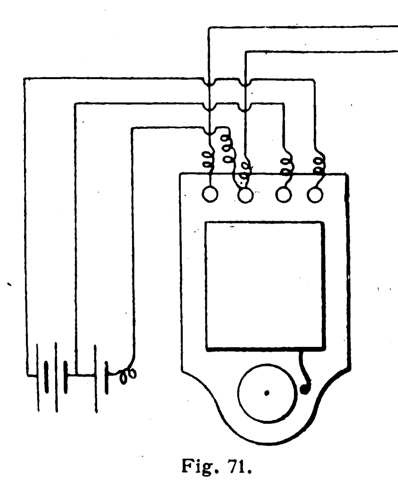


Fig. 71.

3.ª El timbre está algunas veces colocado dentro de la caja de la estación; en estas condiciones, los bornes S_1 y S_2 son innecesarios, y sólo hay cuatro bornes, como representa la figura 71; las conexiones interiores se deducen fácilmente de las indicadas en la figura 70.

Llamada magnética. — El *llamador magnético* es una pequeña máquina magneto-eléctrica de corriente continua, movida a mano, que sirve para sustituir a la pila de llamada. En las estaciones con llamada magnética no hay llave de llamada; por consiguiente es preciso, como hemos dicho en la página 46, que cuando el receptor esté colgado y la magneto en reposo, uno de los hilos de línea esté unido a un borne timbre; es preciso, además que cuando se dé vueltas a la manivela, dicha conexión se interrumpa y los dos bornes de la

magneto se unan a los dos hilos de la línea. Para realizar estas condiciones, la magneto se construye del modo siguiente (fig. 72):

Los extremos *a* y *b* del circuito del inducido están fijos, uno a la masa, el otro a un pequeño disco *d* aislado de la masa y movido al mismo tiempo que el indu-

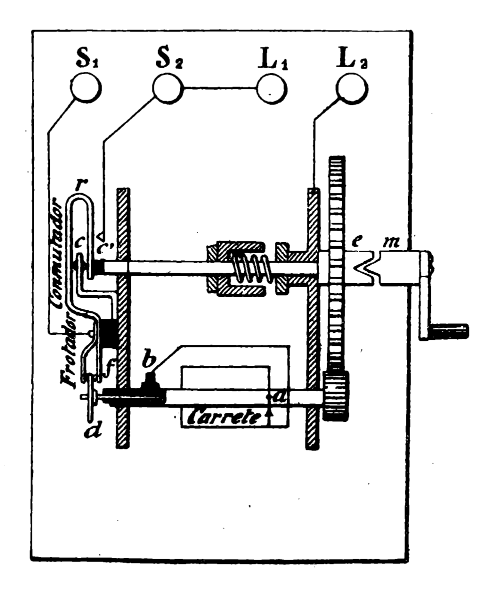


Fig. 72.

cido. Sobre este disco se apoyan dos frotadores *f* fijos en el extremo de dos muelles: estos frotadores están unidos por una parte al borne S_1 y por otra parte a un muelle curvado *r*. Estando quieta la manivela, el extremo (de materia aisladora) de su eje aprieta la lámina flexible del muelle *r* contra un contacto *c* fijo en el extremo de una escuadra atornillada sobre una de las placas de la magneto, y por consiguiente unida eléctricamente, por la masa, con el extremo *a* del inducido.

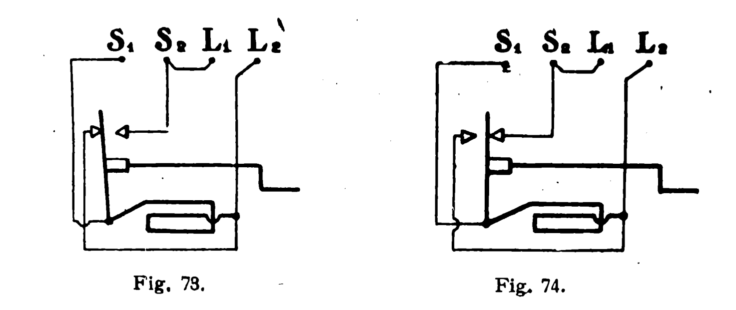


Fig. 73.

Fig. 74.

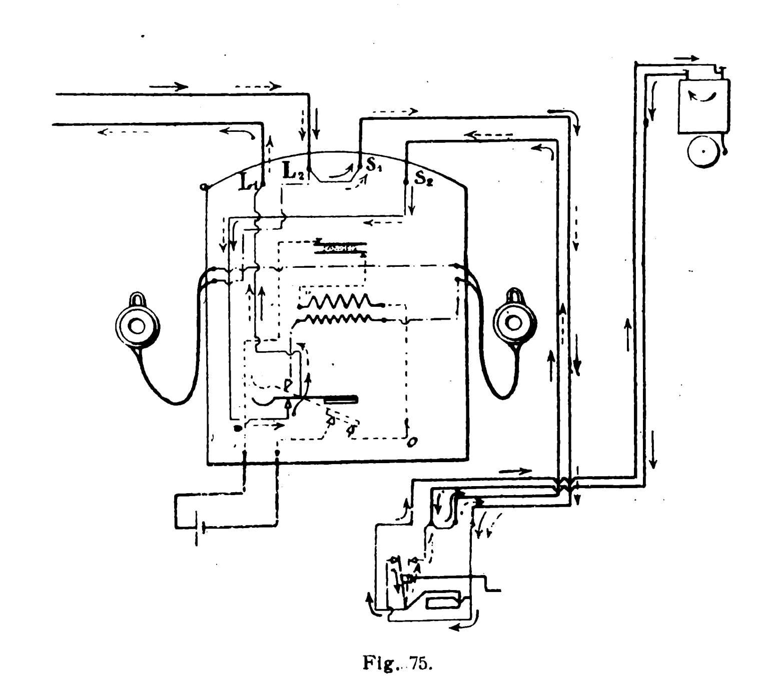


Fig. 75.

La masa de la magneto está además conectada a un borne L_2. Se ve, pues, que en reposo, el borne S_1 está unido directamente con el borne L_2 por la masa. La manivela está montada sobre el árbol de arrastre, y el manguito *m* lleva un diente que engrana en la muesca *e*.

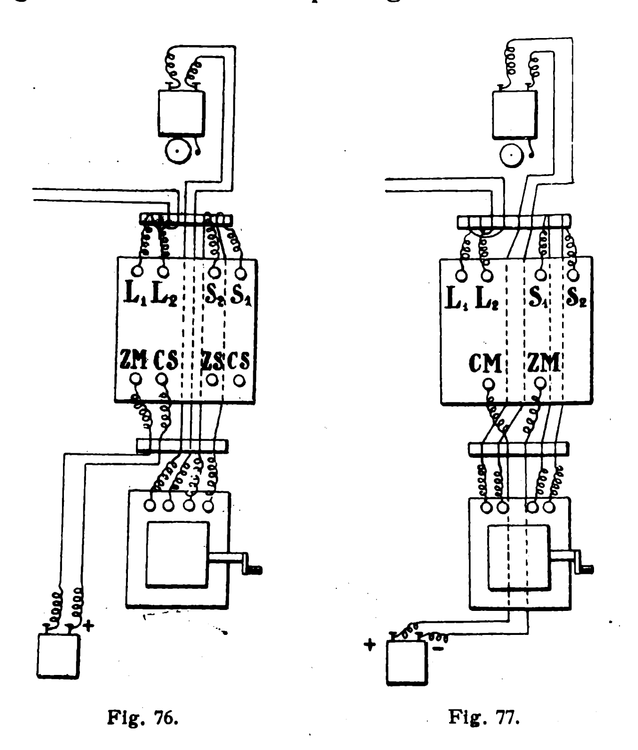
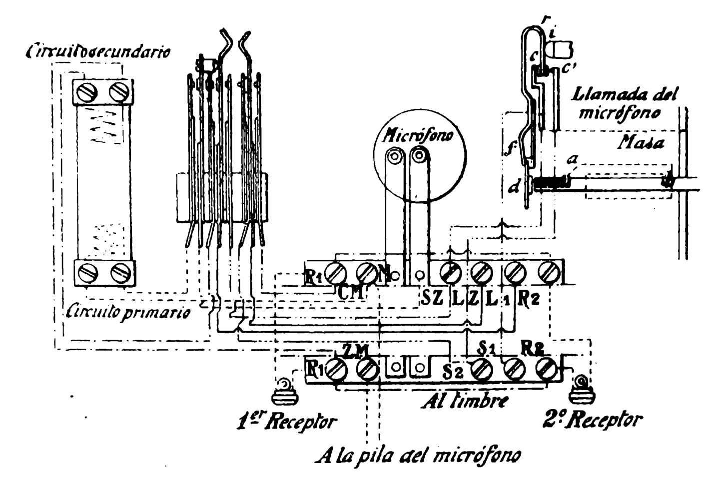
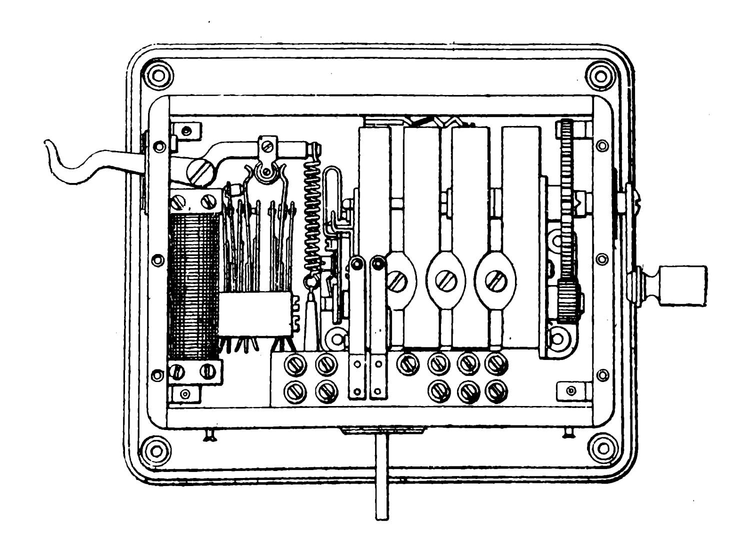


Fig. 76. Fig. 77.

Cuando se da vueltas a la manivela, el diente frota en la muesca y el árbol se mueve hacia la manivela; el extremo de ésta deja de apoyarse en la lámina del muelle, el cual rompe el contacto con *c* para establecerlo con *c'*, que está unido al borne S_2 conectado a su vez con otro borne L_1. Se ve que cuando la magneto está funcionando, no hay comunicación entre S_1 y L_2, y que los


Circuito secundario
Micrófono
Llamada del micrófono
Masa
Circuito primario
R1
CM
SZ
L
Z
L1
R2
ZM
S1
S2
R1
R2
Al timbre
1.er Receptor
2.º Receptor
A la pila del micrófono
Fig. 78.


Fig. 79.

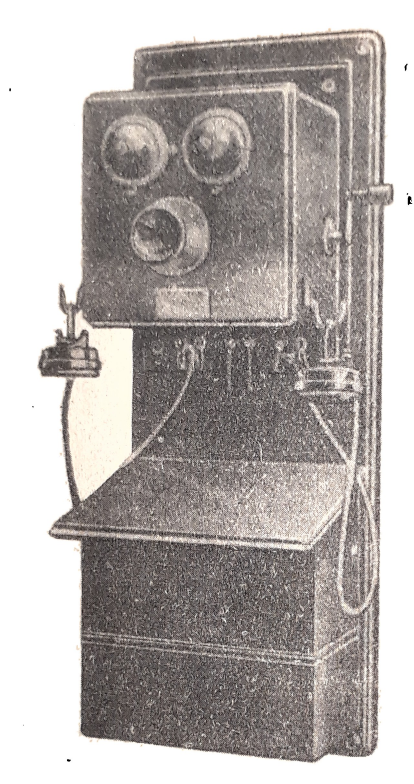


Fig. 80. — Estación con llamada magnética.
La caja inferior contiene las pilas del circuito microfónico.

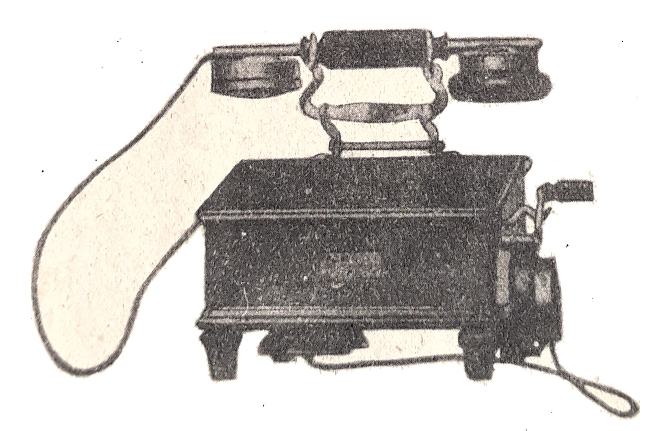


Fig. 81. — Estación con combinado y llamada magnética.

dos polos están unidos, uno al borne L_1 y el otro a L_2. Las figuras 73 y 74 representan esquemáticamente esta llamada magnética.

El esquema de montaje de una estación con llamada magnética está representado en las figuras 75 a 81.

II. Comunicación entre una estación cualquiera y una estación central

1.° Circuito primario

a) *Sin reciprocidad ni diferenciación de las llamadas.* — La central *C* puede llamar a las otras diversas estaciones. Es, por ejemplo, lo que sucede en una instalación que permita a un director de fábrica comunicarse con los distintos jefes de fabricación.

La instalación está montada tal como indica la figura 82

b) *Sin reciprocidad pero con diferenciación de las llamadas.* — Tomemos como ejemplo el caso de una instalación que conecte distintas oficinas a una estación central, o el de las instalaciones en los inmuebles en que las distintas viviendas están conectadas con la portería. Un cuadro indicador permite distinguir la estación que hace la llamada.

Hay muchos modos de obtener estas condiciones de funcionamiento: uno de los procedimientos es el representado por las figuras 84 y 85.

Para evitar el repetir las conexiones interiores, basta recordar que en los aparatos de tres bornes (estando dispuestos estos bornes 1, 2 y 3 como se indicó en la página 36), estas conexiones son tales que:

1.° *Estando colgado el receptor y el botón de llamada sin oprimir,* el borne 1 está unido directa-

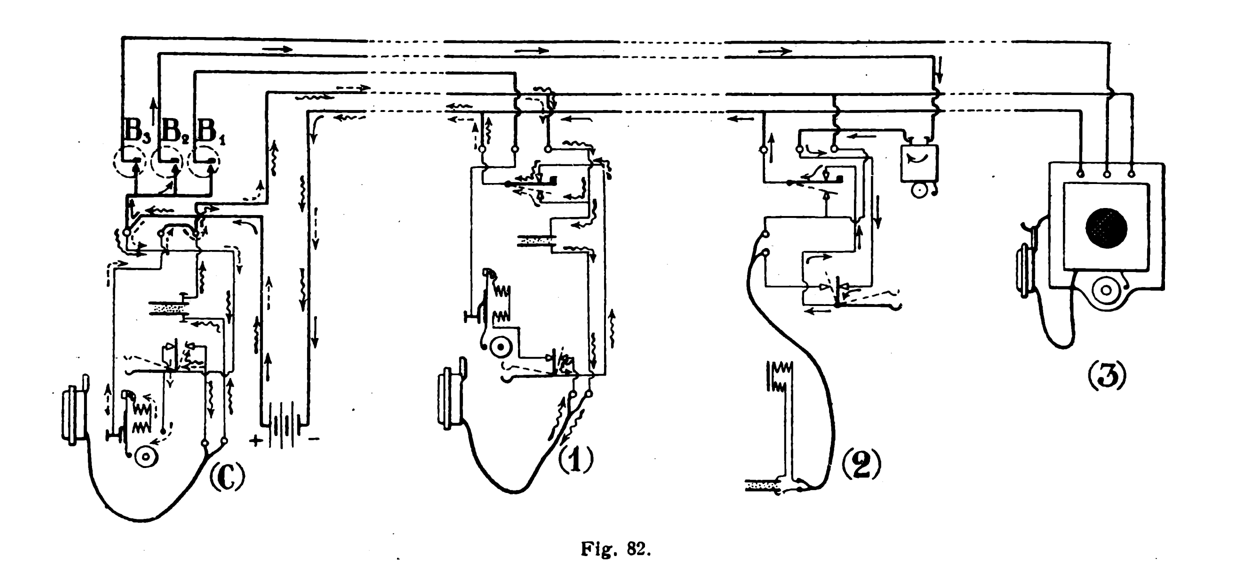


Fig. 82.

mente al 2 si el timbre es exterior, y al 3 por intermedio del timbre cuando es interior;

2.° *Estando colgado el receptor y apretado el botón de llamada,* el borne 1 está unido directamente al 3;

3.° *Estando descolgado el receptor y sin apretar el botón de llamada,* el borne 1 está unido al 3 por intermedio del micrófono y del receptor.

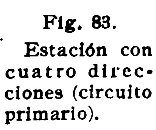


Fig. 83. Estación con cuatro direcciones (circuito primario).

Además del cuadro indicador que sirve para avisar en la estación central de qué punto proviene la llamada, hay un cuadro conmutador o cuadro de *jack-knives* en esta estación. Este cuadro tiene: 1.°, tantos agujeros como estaciones hay que comuniquen con la central; 2.°, dos bornes por cada estación: estos dos bornes están unidos dentro del cuadro a dos láminas flexibles $a_1 b_1$, $a_2 b_2$, y conectados fuera del cuadro, uno con el borne 1 de cada estación y el otro con el borne del cuadro indicador correspondiente a esta estación. Una clavija que comunica mediante un hilo flexible con un borne *A* del cuadro conmutador puede colocarse en cada uno de estos agujeros. Cuando la clavija no está colocada, las dos láminas flexibles están en contacto. de manera que el borne 1 de cada estación está en comunicación con el borne correspondiente del cuadro indicador. Cuando se coloca la clavija en uno de los agujeros, se rompe la comunicación entre las dos láminas, y la lámina unida al borne 1 de la estación correspondiente a este agujero comunica por la clavija y el cordón con el borne *A* del cuadro conmutador.

Es fácil darse cuenta del funcionamiento de la instalación observando la figura 84. Supongamos, por ejemplo, que la estación 1 quiera llamar a la central *C*, para lo cual cerrará su llave de llamada, estableciendo así la comunicación directa del borne 1 con el 3. La corriente que parte del polo + de la pila *P* pasa de la lámina b_1

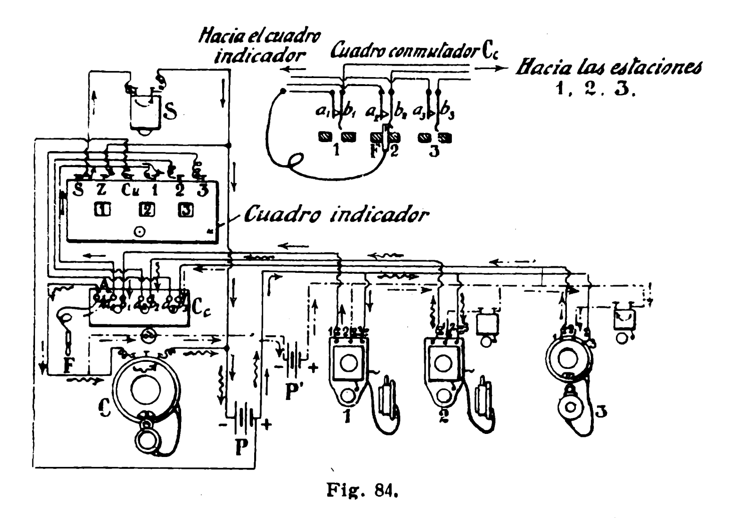


Fig. 84.

a a_1, llega al borne 1 del cuadro indicador del timbre *S* y vuelve a la pila por el polo —. El timbre de la central *C* suena y el número 1 aparece en el cuadro.

Supongamos que la estación 2 haya llamado a la central *C* del mismo modo que hemos visto para la 1. En la central se introduce la clavija *F* en el jack 2 del cuadro conmutador, con lo cual se separan las láminas a_2 y b_2 y se pone b_2 en comunicación con *A*.

Como, por otra parte, la estación 2, después de haber sido llamada, descuelga su receptor, el borne 1 de esta estación está unido al 3 por intermedio de su receptor y de su micrófono. La corriente de conversación sale del polo + de la pila *P* y después de pasar por el micró-

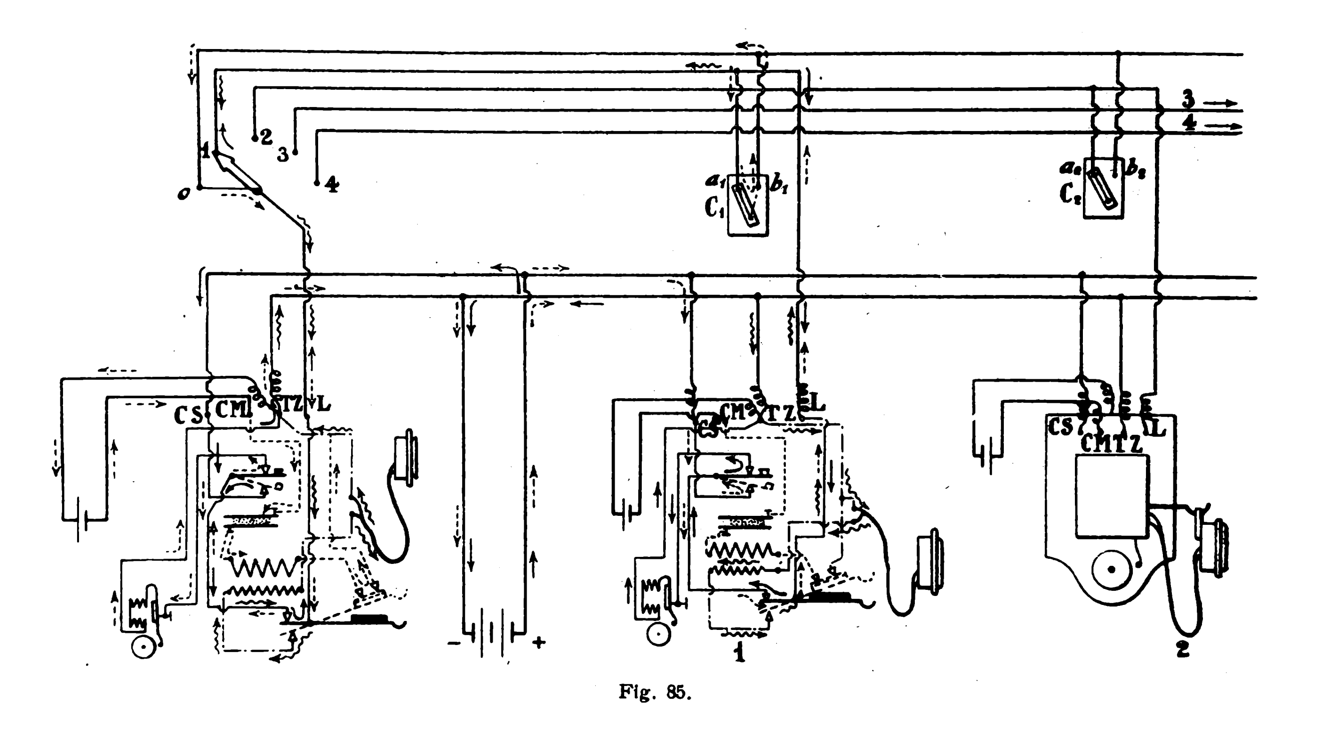


Fig. 85.

fono y el receptor de la estación 2 llega a la lámina b_2, pasa por la clavija F al borne A, de allí al receptor y al micrófono de la central y vuelve a la pila por el polo —

c) *Con reciprocidad y diferenciación de las llamadas.* — Si se quiere que la central pueda llamar a una cualquiera de las estaciones, es preciso agregarle un botón B y una pila P. Se ve fácilmente que para llamar a la estación 3, por ejemplo, bastará introducir la clavija 1 en el jack 3 y cerrar B.

2.° Circuito secundario

La figura 86 representa el esquema de montaje de una instalación de dos direcciones, por conmutadores C_1 y C_2.

Cuando la central quiera llamar a una estación cualquiera es suficiente colocar la manecilla del conmutador C sobre el tope de contacto correspondiente a esta estación y bajar la llave de llamada. Se comprende fácilmente el funcio-

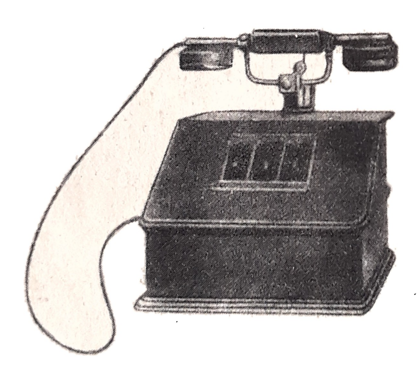


Fig. 86.—Estación central de tres direcciones, sin discriminación de llamadas (circuito secundario).

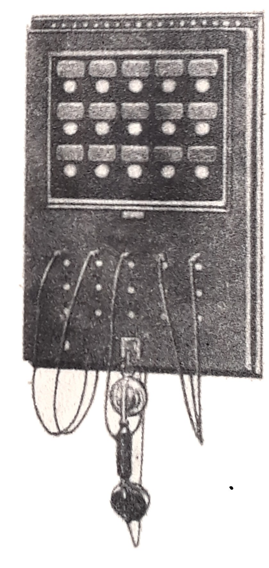


Fig. 87. — Estación central con cuadro indicador de llamadas.

namiento siguiendo la dirección de la corriente en el esquema. Las estaciones 1, 2, 3... conservan la manecilla de sus conmutadores sobre sus topes de la izquierda a_1, a_2..., tanto en estado de reposo como durante la conversación.

Si una estación quiere llamar a la central, coloca la manecilla de su conmutador sobre el tope de contacto de la derecha b_1, b_2..., con lo cual quedan conectados directamente los topes a_1 y b_1, a_2 y b_2....

III. Intercomunicaciones directas entre dos estaciones cualesquiera

Hay varios procedimientos mediante los cuales pueden llamarse entre sí y conversar varias estaciones

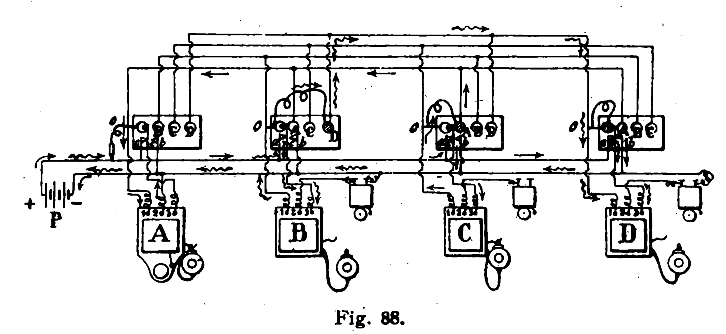


Fig. 88.

derivadas en una misma red de líneas. El esquema de la figura 88 da una solución de este problema.

Supongamos, por ejemplo, que la estación C quiera llamar a la estación A; en A y en C están los receptores colgados, y en C la clavija del cuadro conmutador está colocada en el agujero A; se ve que la corriente sale del polo + de la pila P, llega a la lámina a, después al borne 3 de la estación C por la lámina flexible c, y por estar el receptor colgado y la llave de llamada cerrada,

pasa directamente al borne 1, de allí a *o*, al agujero *A* por la clavija, y a la línea. Esta corriente llega al borne 1 de la estación *A* y, estando el receptor colgado y la llave de llamada abierta, pasa al borne 2 después de haber atravesado el timbre, y por último al polo — de la pila.

Supongamos además que la estación *B* haya llamado a la estación *D* del mismo modo que hemos indicado



Fig. 89. — Estación de intercomunicación con una línea-red automática y tres líneas privadas (Ericsson).

para *A* y *C*; la clavija de *B* está en el agujero *D* de su cuadro conmutador; en la estación *D* la clavija, introducida en el agujero de la izquierda, separa con su perno aislador la lámina flexible *c* de la lámina *a*, estableciendo en cambio el contacto con la lámina *b*. En ambas estaciones están descolgados los receptores. La corriente de conversación sale del polo + de *P*, pasa por las láminas *a* y *c* del cuadro conmutador de *B*, llega al borne 3 de esta estación, recorre el receptor y

el micrófono, pasa por el borne 1 y, por la línea, llega al borne 1 de la estación *D*, atraviesa su receptor y su micrófono, pasa por el borne 3, las láminas *c* y *b*, y vuelve por la línea a la pila *P*, entrando por el polo —.

Las estaciones de intercomunicación no exigen la presencia de un personal especial, pues siempre están prontas para el servicio. En cambio, necesitan canalizaciones importantes porque cada estación debe estar directamente conectada a todas las demás, lo que ocasiona un gasto crecido cuando las estaciones están alejadas entre sí.



Fig. 90. — Estación mixta de intercomunicación, portátil; una línea-red y cinco líneas privadas.

Por último, la capacidad máxima admisible para estos aparatos es de 10 aproximadamente; pasando de esta cifra son muy voluminosos y el coste de la instalación excede al de una central automática particular.

Las estaciones de intercomunicación pueden ser exclusivamente particulares o mixtas, es decir, que además de las líneas particulares comprendan una o varias líneas de la red.

Las estaciones mixtas dan las siguientes facultades:

1.ª Llamar directamente y hablar con todas las estaciones de la instalación (mixtas o particulares). Recibir las llamadas de estas mismas estaciones.

2.ª Tomar directamente la línea de la red indicando la ocupación de la misma a todas las otras estaciones mixtas. Dejar libre la línea cuando ha terminado la conversación. Tener una indicación óptica de la ocupación de la red por una cualquiera de las otras estaciones mixtas.

3.ª Permitir suspender momentáneamente una comunicación de red ocupada, con objeto de obtener alguna información de otra estación previniendo a la línea de la red y evitando que la conversación interior pueda ser oída desde el exterior.

Funcionamiento. — 1.° *Establecimiento de una comunicación particular.*—Al descolgar el combinado,

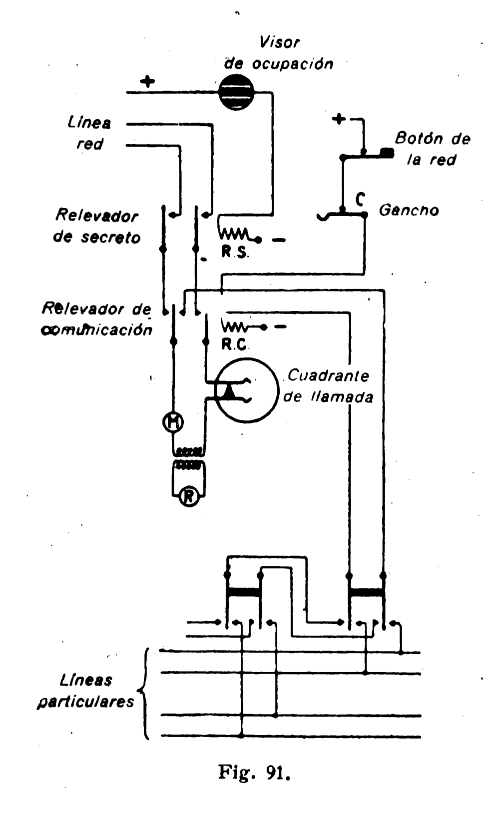


Fig. 91.

el gancho *C* se levanta y cierra el circuito de la batería sobre el arrollamiento del relevador de comunicación *RC*.

Este relevador dirige entonces el receptor hacia los botones particulares. Oprimiendo el botón elegido se le pone en comunicación con la línea particular correspondiente.

2.° *Establecimiento de una comunicación con la red.* — Oprimiendo el botón de la red se corta la alimentación del relevador *RC* y el receptor es entonces dirigido hacia la línea de la red. Pero la comunicación con ésta no queda todavía establecida, pues es preciso, aun dentro del grupo de teléfonos de la estación, que sea respetado el secreto de las comunicaciones con la red, es decir, que la estación no pueda mediar en la conversación que se venía sosteniendo.

Al efecto, entre la línea de la red y el relevador *RC* se encuentra un relevador de secreto *RS.* La comunicación con la línea de la red no puede establecerse más que cuando este relevador está excitado. Pero esta excitación solamente puede producirse en el caso de que el visor de ocupación de la línea de la red se encuentre en la posición «libre».

IV. Intercomunicación entre dos estaciones cualesquiera por intermedio de un standard

1.° Manual

En la central hay un cuadro en que están dispuestos *anunciadores* y *jacks,* cuyo número es igual al de estaciones unidas al mismo.

Anunciador. — Un anunciador es un aparato que sirve para indicar cuál es la estación que llama para pedir comunicación con otra estación. Está formado por un electroimán cuya armadura es una palanca que puede oscilar alrededor de un eje *O* (fig. 92). Cuando el electroimán está excitado por una corriente, el brazo

menor de la palanca es atraído; el otro brazo se levanta, y el indicador v, sujeto por el gancho c de este brazo, oscila alrededor de su eje o', dejando al descubierto un número, que es el de la estación a que está unido.

Este indicador se apoya sobre un contacto m, cerrando el circuito de una pila local P sobre el timbre de la central. Cuando la corriente deja de pasar por el

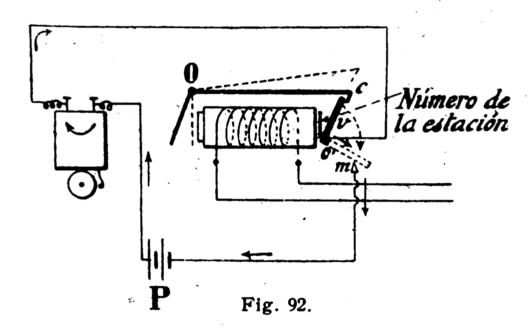


Fig. 92.

electroimán, basta levantar el indicador, que quedará sujeto por el gancho de la palanca, estando así el anunciador dispuesto para indicar otra señal de llamada.

Jack. — Se llama *jack* [1] o *jack-knife* a un conmutador de clavija, de forma especial. Estos conmutadores, muy empleados en las redes telefónicas, difieren entre sí por el número de contactos y de rupturas que deben producir.

Para la instalación de que nos estamos ocupando, el jack empleado está constituído del modo siguiente (figuras 93 y 94):

El extremo fijo de la lámina flexible A está unido por

(1) Este aparato debe su nombre al muelle que tenía en los primeros modelos; este muelle tenía la forma de la hoja de un cuchillo, construído por un fabricante llamado Jack. Jack-knife que es el nombre inglés, significa en castellano *cuchillo de Jack*.

una línea al borne *L* de la estación correspondiente; la lámina *B*, que lleva un contacto *C*, comunica con uno de los extremos del carrete del anunciador, cuyo otro extremo está unido a una línea común a todas las estaciones. Cuando se coloca una clavija *F* en el jack, la lámina *A* se levanta, el extremo *A* está unido al hilo soldado a la varilla metálica del extremo de la clavija, y el contacto entre *A* y *B* se interrumpe.

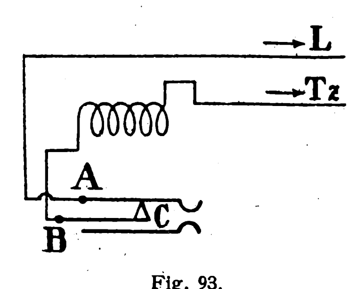


Fig. 93.

La figura 95 es el esquema de las conexiones entre una central *C* provista de un cuadro indicador *T* y cuatro estaciones 1, 2, 3 y 4.

Si una estación, 2 por ejemplo, quiere llamar a la central, basta que cierre su llave de llamada; para atender a la llamada de la estación se introduce la clavija unida al borne *L* de la central en el jack de la estación que ha llamado. Para establecer la comunicación entre dos estaciones cualesquiera, 1 y 4 por ejemplo, basta introducir clavijas fijadas en los extremos de un mismo cordón, en los jacks de estas dos estaciones.

Fig. 94.

Cuadro conmutador o «standard» (fig. 96). — Es un cuadro, instalado en la estación central, al cual llegan los hilos de línea de un número más o menos grande de estaciones, y en el cual hay dispuestos órganos que permiten las siguientes maniobras:

1.ª Llamada a la central desde una estación cualquiera, con indicación del número de esta estación;

2.ª Comunicación telefónica entre cada estación y la central;

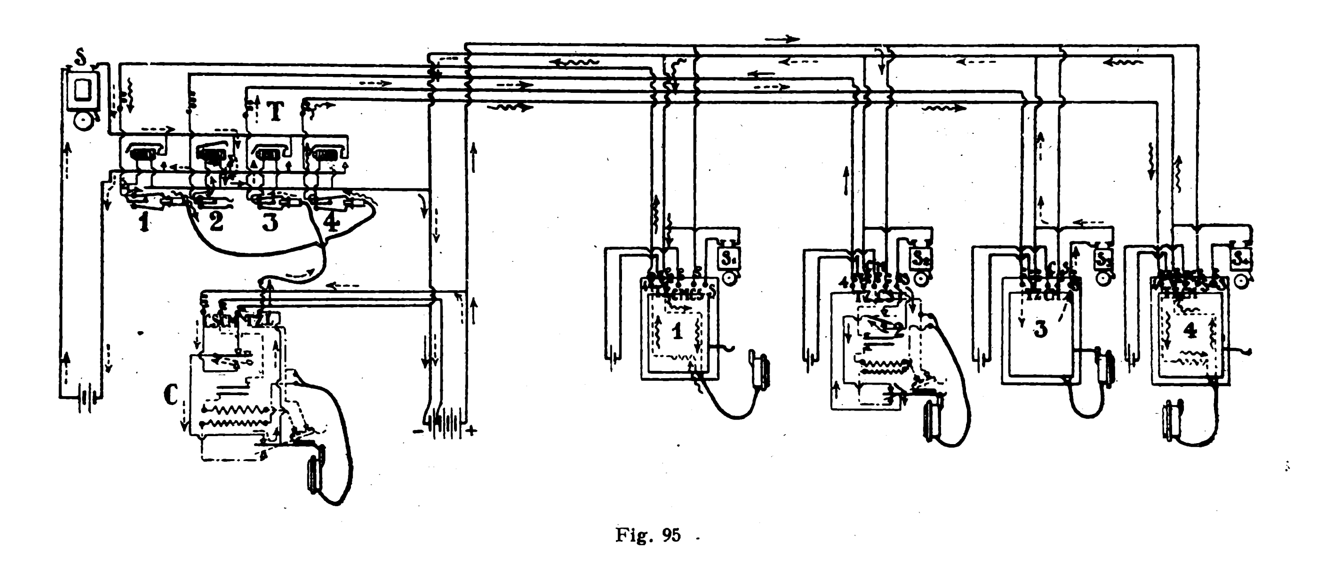


Fig. 95.

3.ª Llamada a una estación cualquiera desde la central;

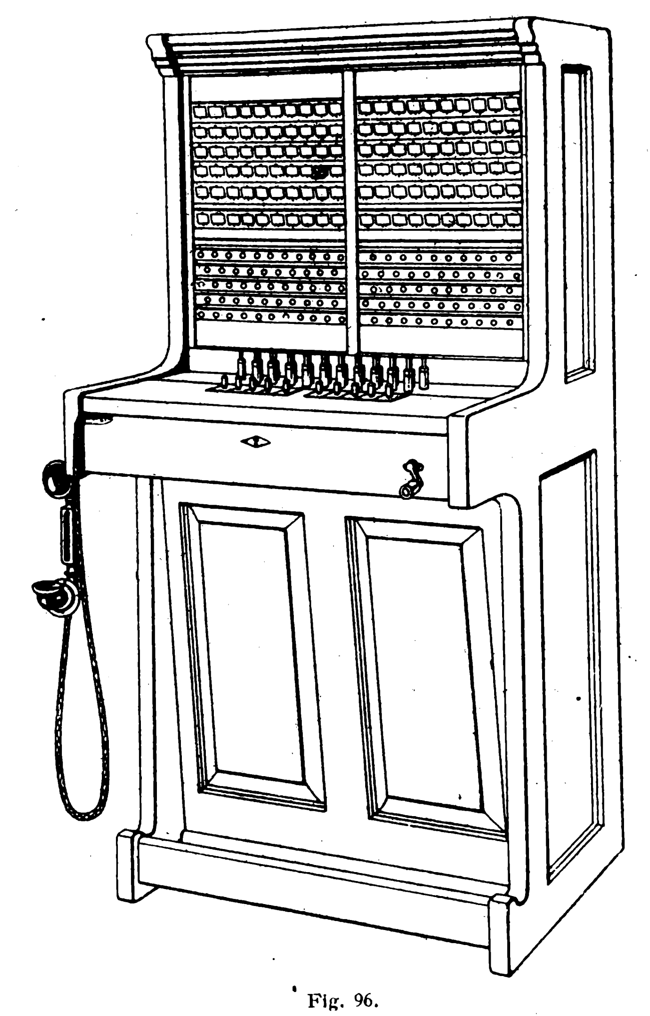


Fig. 96.

4.ª Comunicación telefónica entre dos estaciones cualesquiera;

5.ª Indicación por una de las dos estaciones que comunican entre sí, del final de la conversación;

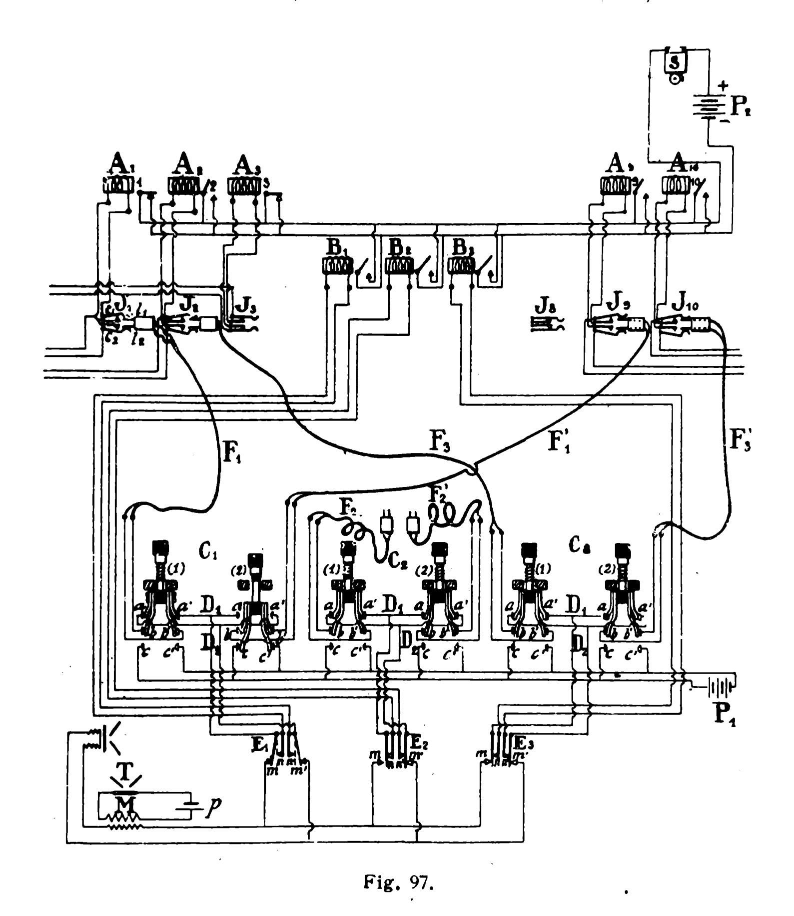


Fig. 97.

6.ª Posibilidad para la central de darse cuenta, mediante su teléfono, de si una conversación entre dos estaciones ha terminado o continúa.

Por ejemplo, si el standard está construído para diez estaciones, contendrá (fig. 97):

Diez anunciadores de llamada, con los números A_1, A_2, $A_3 \ldots A_{10}$;

Diez jacks: $J_1, J_2, J_3 \ldots J_{10}$;

Tres pares de llaves de llamada: C_1, C_2, C_3;

Tres llaves de escucha: E_1, E_2, E_3;

Tres pares de clavijas: F_1, F'_1; F_2, F'_2; F_3, F'_3, con sus cordones;

Tres anunciadores de fin de conversación: B_1, B_2, B_3;

Un teléfono combinado T, con su pila microfónica p;

Una pila de llamada P_1;

Una pila de timbre P_2;

Un timbre S.

Estos distintos órganos están conectados entre sí del modo indicado en la figura 97.

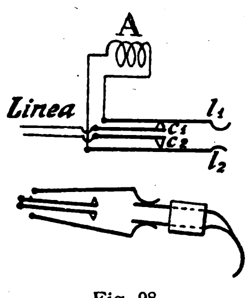


Fig. 98.

Se ve que los jacks son de doble ruptura y que los cordones unidos a las clavijas son de dos hilos. Cuando hay una clavija que no está introducida en un jack, las dos líneas de la estación correspondiente a este jack están unidas mediante los contactos c_1 y c_2 a los extremos del hilo del carrete del anunciador A (fig. 98). Cuando se introduce la clavija, las láminas l_1 y l_2 se separan, los contactos en c_1 y c_2 se interrumpen, y los dos hilos de línea quedan unidos a los dos hilos del cordón a que está fijada la clavija.

El funcionamiento de este cuadro se comprende fácilmente siguiendo las conexiones de la figura 97.

Supongamos: 1.° Que la estación 3 llama: la corriente de llamada circula en el carrete del anunciador A_3, el indicador cae sobre el contacto r y la pila P_2 se cierra sobre el timbre S;

2.° Que la estación 1 haya llamado, y la central

quiera entrar en conversación con ella. Se introduce una clavija cualquiera, F_1 por ejemplo, en el jack J_1, y se maneja la llave de escucha E_1 correspondiente al grupo de clavijas F_1 y F'_1, de modo que las dos láminas toquen con los contactos m y m'. El receptor R del teléfono central está unido por E_1, por los contactos a, b, a', b', de la llave de llamada (1) del grupo C_1, y por la clavija F_1, a los hilos de la línea de la estación 1;

3.° Que habiendo pedido la estación 1 comunicación con la 9, la central quiera llamar a esta estación. Se introduce la clavija F'_1 en el jack 9 y se aprieta la llave (2) del grupo C_1, la cual une de este modo los contactos b y c, b' y c', quedando la pila de llamada P_1 cerrada sobre el timbre de la estación 9 por la clavija F'_1;

4.° Que habiendo pedido la estación 2 comunicación con la 10, y habiendo sido ésta avisada por la central, se establezca una conversación entre estas dos estaciones. Las clavijas F_3 y F'_3 están respectivamente en los jacks J_2 y J_{10} y los hilos de línea de las dos estaciones están directamente unidos entre sí.

Si el telefonista de la central quiere saber si aun no ha terminado la conversación, pone las láminas de la llave de escucha E_3 sobre los contactos m, m', quedando así su teléfono en derivación sobre las líneas por los puntos D_1 y D_2. Después de haber comprobado que la conversación continúa, pone las láminas de la llave de escucha E_3 en su posición primitiva.

Una vez terminada la conversación, una de las dos estaciones 2 ó 10 maneja su llave de llamada, pasando así una corriente por la línea al anunciador de fin de conversación B_1, por la derivación D_1, D_2 y la llave de escucha E_3 en su posición ordinaria.

Observación I. — Durante la conversación, el carrete del anunciador está constantemente en deriva-

ción sobre la línea, por consiguiente una parte de la corriente se deriva por este carrete. Para compensar esta disminución de las corrientes útiles resultantes, se da a estos carretes una gran resistencia óhmica y un coeficiente de autoinducción muy elevado.

OBSERVACIÓN II. — En todos los casos que hemos considerado, sólo se utiliza una de las dos llaves de cada grupo, C_1, C_2, C_3. La otra llave tiene por objeto poder llamar a la estación que, habiendo pedido una comunicación, no la ha recibido en seguida, habiéndose ya retirado del aparato la persona que hizo la llamada.

2.º Automático

a) **Principio. Instalación de 10 números.** — Tomemos primeramente como ejemplo una instalación de diez números.

Cada estación está unida a un tope de contacto de

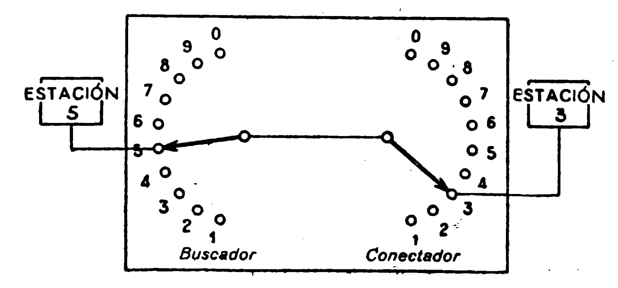


Fig. 99.

un conmutador rotativo de diez direcciones, llamado *buscador de la línea que llama*.

Supongamos que la estación 5 quiera comunicar con la estación 3. Cuando en la estación 5 se descuelga el aparato, las escobillas del buscador, gobernadas por un dispositivo que examinaremos más adelante, empiezan

a girar hasta que se ponen en contacto con los topes de la línea 5.

Por otra parte, las escobillas del buscador están conectadas a las escobillas de un órgano análogo llamado *conectador,* en el que cada tope de contacto está conectado asimismo a una estación de la instalación.

Es la estación demandante la que gobierna la rotación de las escobillas del conectador, de manera que si llama a la estación 3, el conectador avanza tres topes y pone al que llama en comunicación con la estación correspondiente

Esto se efectúa del modo siguiente:

1.° El buscador se detiene sobre la línea que llama;

2.° El conectador se detiene sobre la línea llamada.

Funcionamiento del buscador. — La rotación de las escobillas del buscador es producida por un electroimán que gobierna una rueda dentada por intermedio de una rueda de escape.

El hecho de descolgar el receptor en cualquier estación es causa de que por medio de un relevador de llamada se excite el electroimán y giren los brazos del buscador.

Cuando éstos llegan a los topes de contacto de la línea que llama es enviada una corriente a un relevador (de desconexión), el cual corta la excitación del electro de rotación y entonces el buscador se detiene.

Funcionamiento del conectador. — La rotación del conectador es producida, al igual que la del buscador, por un electroimán.

Veamos cómo se puede gobernar esta rotación desde la estación que llama.

El aparato de la estación que llama está provisto, al efecto, de un cuadrante constituído por un disco perforado que tiene diez agujeros numerados. Para componer

un número se hace girar el disco llevando a la muesca de paro la cifra o las cifras correspondientes.

Pero este disco lleva interiormente diez dientes (uno enfrente de cada cifra). Durante la rotación del cuadrante, estos dientes separan sucesivamente una palanca, la cual abre un contacto cada vez.

De esta manera se envían a la línea impulsiones en número igual al de dientes que han pasado delante de la palanca, es decir, igual al número elegido en el cuadrante.

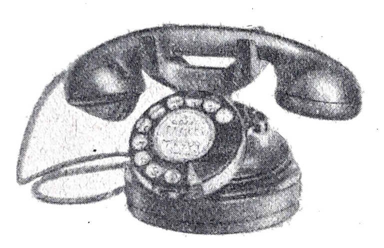


Fig. 100. — Estación móvil automática con combinado C. T. T. H.

Estas impulsiones son enviadas al electroimán del conectador y cada una de ellas hace avanzar las escobillas un tope. Si se ha llamado a la estación 3, el brazo del conectador avanza tres topes y se detiene sobre los topes correspondientes a la línea llamada.

El conjunto de un buscador y un conectador se designa con el nombre de *órgano de conexión* o *cordón de conversación*. En efecto, este conjunto desempeña el mismo papel que el cordón que, en telefonía manual, es colocado por la operadora entre el jack del que llama y el jack del llamado.

La instalación automática tal como se acaba de describir sólo permite sostener una conversación cada vez. En efecto, el buscador y el conectador quedan inmovilizados durante toda la duración de la comunicación.

Para permitir varias conversaciones a la vez es preciso disponer de cordones de conversación en número igual al número máximo probable de conversaciones simultáneas. Esta cifra se deduce del estudio del tráfico

y, en general, es del orden del 20 °/₀ del número total de estaciones.

b) **Caso de instalaciones de 24 números.** — La mayor parte de constructores de aparatos telefónicos fabrican muebles automáticos de 24 números.

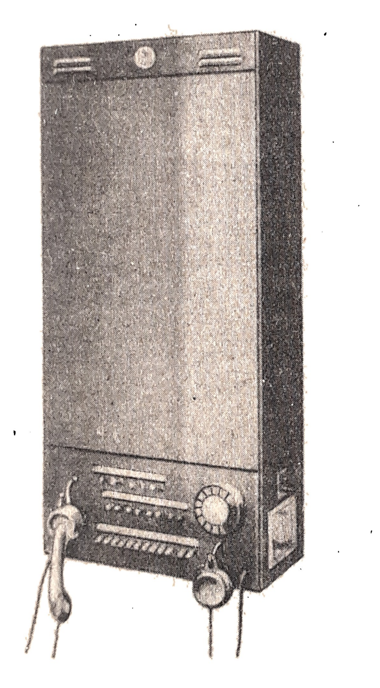


Fig. 101.
Autoconmutador de 10 direcciones y tres líneas.

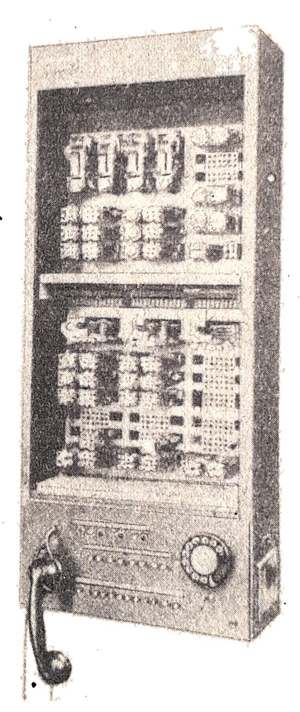


Fig. 102.
Red de toma directa.

La práctica ha demostrado que este número es conveniente para muchas instalaciones particulares.

Para llamar a los 24 números con el cuadrante de diez cifras se opera como se indica a continuación.

Los números de llamada son los siguientes:

1	2	3	4	5	6	7	8
91	92	93	94	95	96	97	98
991	992	993	994	995	996	997	998

Los buscadores y los conectadores llevan 26 topes de contacto.

Para componer un número de dos cifras, por ejemplo el 97, se envía primeramente, por medio del cuadrante, una primera tanda de nueve impulsiones, con lo que se hace avanzar nueve topes el conectador.

Pero este noveno tope está aislado y, por tanto, no se produce llamada alguna. Después se envía al cuadrante la cifra 7, con lo cual se produce una nueva tanda de siete impulsiones, el conectador avanza de nuevo siete topes y se pone en comunicación con la línea llamada.

Se operaría de la misma manera para componer un número de tres cifras, pues el tope décimoctavo del conectador está aislado.

c) **Caso de instalaciones de 100 números.** — En este caso es necesaria una doble selección y el contador debe:

1.° Buscar la decena en la que se encuentra la estación llamada;

2.° En esta decena buscar la unidad que corresponde a la estación llamada.

Para resolver este problema se han propuesto numerosos sistemas.

1.° SISTEMA STROWGER. — En este sistema, los conectadores comprenden, para la parte fija, cien pares de topes de contacto dispuestos en diez filas superpuestas de diez pares.

En cuanto a la parte móvil, está montada sobre un

árbol vertical que puede recibir dos movimientos, uno de traslación vertical y otro de rotación.

Estos dos movimientos son gobernados por electroimanes.

Las impulsiones correspondientes a la cifra de las decenas son enviadas al electroimán que lleva las esco-

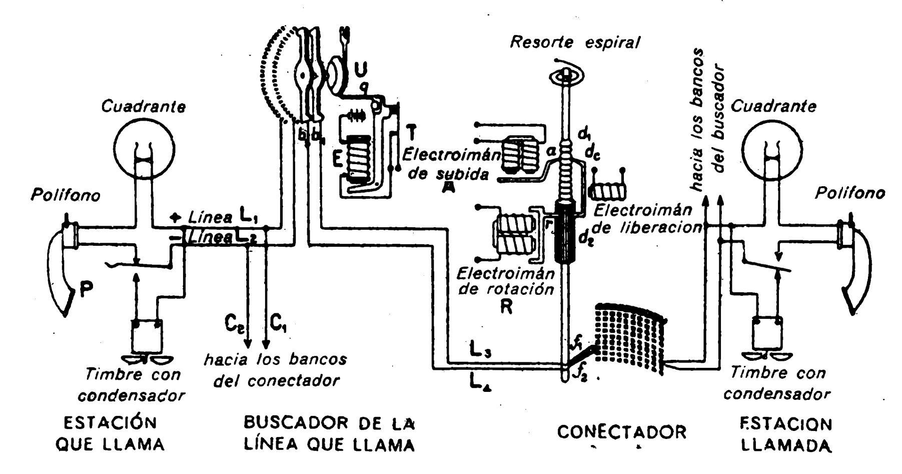


Fig. 103.

billas del conectador a la altura de esta decena Después el electroimán de rotación recibe la cifra de las unidades y lleva las escobillas frente a los topes de la línea llamada (fig. 103).

2.° Sistema Rotary. — La parte fija del conectador es la misma que en el sistema precedente, pero la parte móvil, en lugar de estar constituída por un solo par de escobillas que pueden subir o bajar, comprende diez pares de escobillas correspondientes cada uno de ellos a una fila de topes de contacto.

Si no hay llamada, estas escobillas no pueden tocar a los topes de su fila porque están desviadas hacia atrás por gatillos aislantes.

El envío de una serie de impulsiones tiene por efecto desengatillar las escobillas de la decena correspondiente y permitir que se pongan en contacto con los topes de su fila.

La segunda serie de impulsiones produce entonces la rotación del eje de las escobillas.

3.° SISTEMA R6. — La característica esencial de este sistema consiste en el hecho de que las impulsiones emitidas por el que llama no son recibidas directamente por el conectador, sino que le son transmitidas por intermedio de un órgano auxiliar que ofrece poca inercia y se llama conmutador de control.

El papel desempeñado por los conmutadores de control es llevar los conectadores a la posición deseada, lo cual se efectúa gracias a una tercera corona y un tercer brazo en el conectador. Los conmutadores de control no actúan más que en el momento en que se compone el número y quedan libres así que éste ha quedado formado. Por consiguiente, pueden encontrarse en número inferior al de conectadores, que deben permanecer activos durante toda la conversación.

En el modelo construído por la Compañía de los Teléfonos Thomson-Houston, los conmutadores de control tienen 11 direcciones (con un tope muerto) y los conectadores tienen 51 direcciones (con un tope muerto).

El conectador comprende dos filas de 50 pares de topes activos y, por tanto, puede servir a 100 líneas; las líneas cuya cifra de las decenas es impar están conectadas a la fila superior, por ejemplo, y las líneas cuya cifra de las decenas es par están unidas a la fila inferior. La selección de la cifra par o impar se obtiene mediante un relevador de conmutación de los frotadores.

Entonces el funcionamiento de un conectador es el siguiente (fig. 104):

Si, por ejemplo, se llama al número 34, el conmuta-

dor de control avanza tres pasos y lleva los frotadores del conectador delante de la línea 31; después el conmutador de control vuelve al cero, recibe entonces la

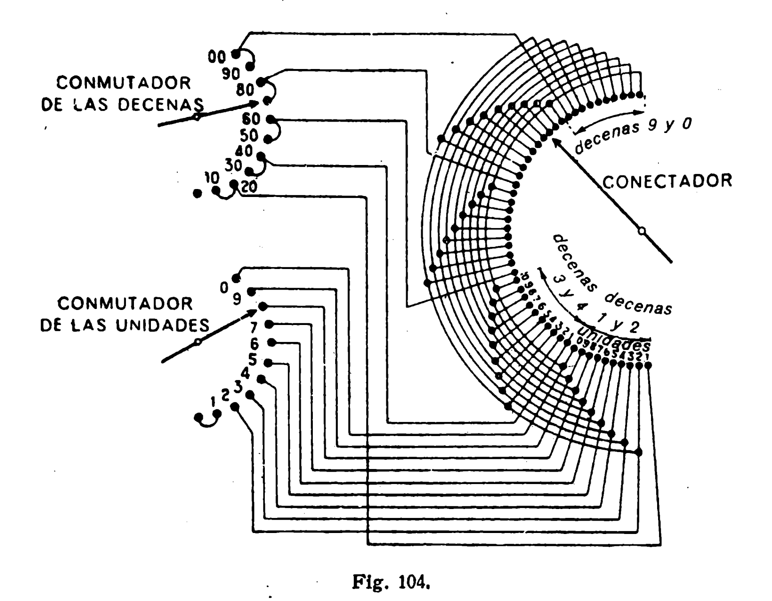


Fig. 104.

cifra de las unidades, 4, avanza cuatro pasos y los frotadores del conectador se detienen delante de la línea 34.

d) **Caso de instalaciones de más de 100 números.** — En las instalaciones que sirven a un número de líneas que puede llegar a 999, es necesario, además de los conectadores, un órgano suplementario de selección que permita elegir la centena llamada. Este órgano se llama *selector* y, en general, su construcción es idéntica a la de un conectador. La primera misión desempeñada por el selector es prolongar la línea del que llama hacia un conectador, el cual acabará de realizar la operación de selección. Pero entre los conectadores correspondien-

tes a la centena llamada puede haber algunos que estén ocupados por otras conversaciones y, por tanto, la segunda función del selector es la de elegir un conectador libre entre los que haya disponibles.

En el sistema Strowger, el selector realiza, por su movimiento de ascenso, la selección de la centena, y por su movimiento de rotación, la selección de un conectador disponible en esta centena.

En el sistema R6, los 50 topes activos del selector están agrupados en diez sectores de cinco, de manera

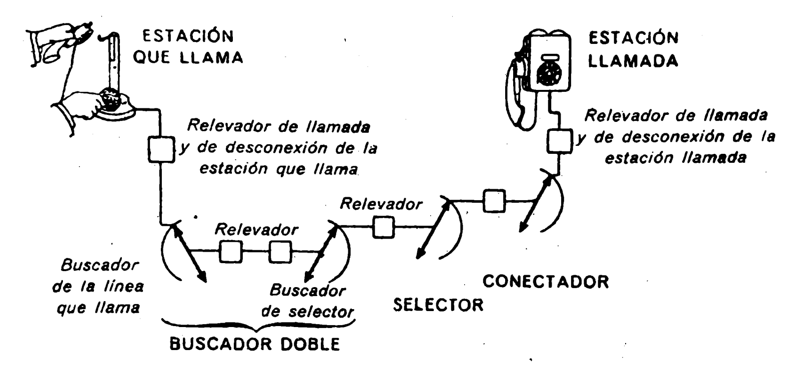


Fig. 105.

que a cada decena pueden corresponder cinco conectadores (es conveniente modificar esta repartición).

Si el abonado llama, por ejemplo, al número 234, el conmutador de control del selector recibe dos impulsiones, sus frotadores avanzan dos pasos y el selector hace avanzar sus escobillas en el sector 2, donde toma la primera línea conectada a un conectador libre. El resto de la operación se efectúa tal como hemos dicho anteriormente.

En lo que antecede hemos supuesto que a cada buscador de línea corresponde un selector especial. Pero

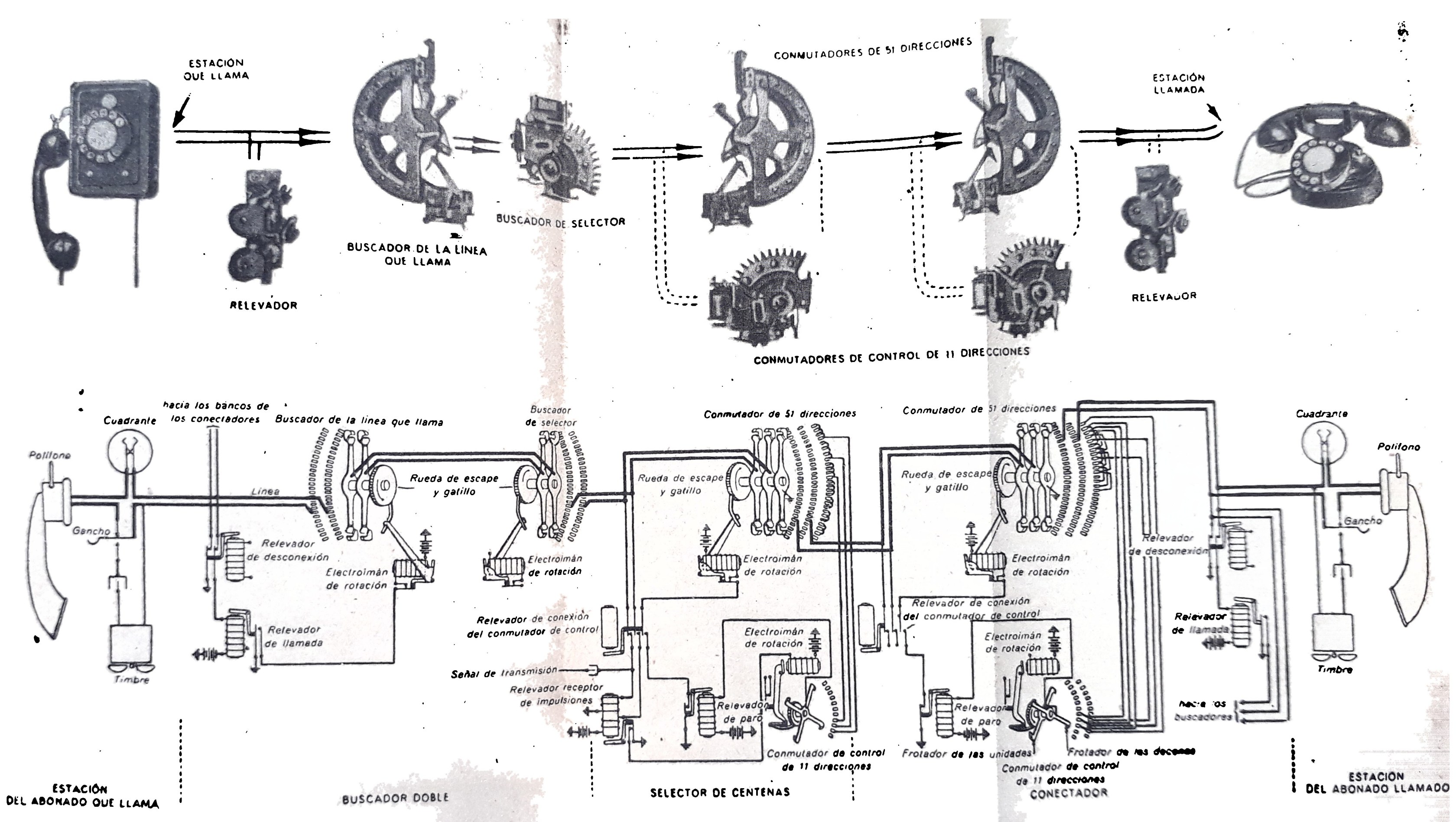


Fig. 106. — Esquema general de una comunicación telefónica mediante un autoconmutador sistema R 6 (Compañía de los Teléfonos Thomson-Houston).

puede no ser así, y en este caso cada buscador deberá elegir un selector libre. Al efecto se anexa al buscador de línea un *buscador de selector*. El conjunto de ambos buscadores se llama *buscador doble*.

Para las instalaciones cuyos números tienen cuatro cifras hay selectores de millares, para las de cinco cifras, selectores de decenas de millar, etc.

La figura 106 representa el esquema completo del establecimiento de una comunicación.

V. Redes telefónicas públicas

Aunque el estudio de las redes públicas no entra en el plan de este libro, creemos útil dedicarle algunas páginas, no sólo porque se facilita el montaje y empleo de las estaciones de los abonados conociendo el funcionamiento de las centrales públicas, sino también porque muchas casas de comercio, almacenes, bancos, etc., han adoptado para su servicio privado de teléfonos una organización idéntica a las empleadas en los servicios públicos.

Es evidente que no se puede mantener un servicio telefónico público por medio de los cuadros standards descritos en la página 66, en cuanto el número de abonados pasa de una centena. Por medio de *intercomunicaciones* es posible unir entre sí varios cuadros, servidos cada uno por un telefonista; pero este procedimiento no permite aumentar mucho el número de líneas y no puede emplearse cuando este número llega a 500. Entonces se recurre a los *conmutadores múltiples*.

Conmutador múltiple. — Un conmutador múltiple, o simplemente *un múltiple,* está constituído por un conjunto de cuadros, unos al lado de otros, servido cada uno por un telefonista, y por detrás del cuadro total

así formado van las dobles líneas de todos los abonados. El conjunto de tres cuadros consecutivos constituye una *mesa* o *sección*.

Cada sección tiene un número de jacks igual al número total de abonados y los conductores que llegan a estos jacks están derivados sobre las líneas (de abonados) que pasan por detrás de los cuadros. De aquí

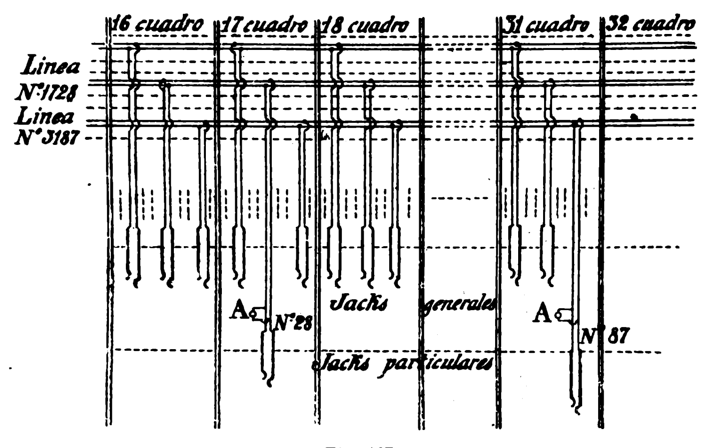


Fig. 107.

resulta que cada telefonista tiene delante de sí un cuadro en el que hay un número de jacks igual al tercio del número total de abonados: como un telefonista puede alcanzar, además de los jacks de su cuadro, a los de los cuadros colocados a su derecha y a su izquierda, puede manejar todos los jacks de los abonados cuyas líneas están unidas a la central. Estos jacks se llaman *jacks generales*; por consiguiente, hay tantos jacks generales por abonado como secciones.

Además de los jacks generales, cada cuadro tiene un cierto número de jacks derivados también sobre las líneas de abonados: éstos son los *jacks individuales* o

1/3 de sección	1.ª SECCIÓN			2.ª SECCIÓN			. . . .	20.ª SECCIÓN			1/3 de sección
	1	2	3	4	5	6		58	59	60	
Anunciadores de llamada											
Anunciadores de fin											
4000 a 6000	1 a 1999	2000 a 3999	4000 a 6000	1 a 1999	2000 a 3999	4000 a 6000	. . . .	1 a 1999	2000 a 3999	4000 a 6000	1 a 1999
Jacks generales											
	1 a 99	100 a 199	200 a 299	300 a 399	400 a 499	500 a 599	. . . .	5700 a 5799	5800 a 5899	5900 a 6000	
Jacks particulares											
Clavijas y llaves											

particulares. Por estos jacks, a los cuales están unidos los anunciadores, es por donde los telefonistas reciben las llamadas de los abonados.

Consideremos, por ejemplo, una central que sirve a 6000 abonados (pág. 83) y supongamos que cada telefonista puede responder a 100 abonados. Cada cuadro tendrá 100 jacks individuales, luego habrá $\frac{6000}{100} = 60$ cuadros, o sea, $\frac{60}{3} = 20$ secciones. Cada cuadro debe tener $\frac{6000}{3} = 2000$ jacks generales y 100 jacks individuales. Además, para que los telefonistas de los extremos del cuadro total puedan alcanzar los 6000 jacks generales, se agregan dos cuadros terminales, de los cuales uno tiene el primer tercio y el otro el último tercio de los jacks generales.

En la parte superior de los cuadros están dispuestos los anunciadores: anunciadores de llamada y anunciadores de fin de conversación. Por debajo están los jacks generales, después los jacks particulares y por último las clavijas y las llaves, montadas como indica el esquema de la figura 107. El manejo de los cuadros es el mismo que el de los standards (pág. 71).

Prueba. — Como sobre cada línea hay derivado un jack general por sección, puede suceder que una línea pedida en una sección se haya dejado puesta en comunicación con un abonado de otra sección, lo cual entorpecería las conversaciones y las haría imposibles. Es necesario, por consiguiente, antes de introducir una clavija de llamada en el jack general de una línea pedida, asegurarse de que esta línea no está en comunicación por otra sección. Esta operación preliminar se llama prueba. Entre los muchos sistemas que hay de realizarla, describiremos en particular el

procedimiento empleado por la sociedad «El Material Telefónico».

Los jacks están modificados de la manera siguiente: van provistos de dos láminas-muelles de desigual longitud l_1 y l_2 y de una tercera lengüeta l_3, formando tam-

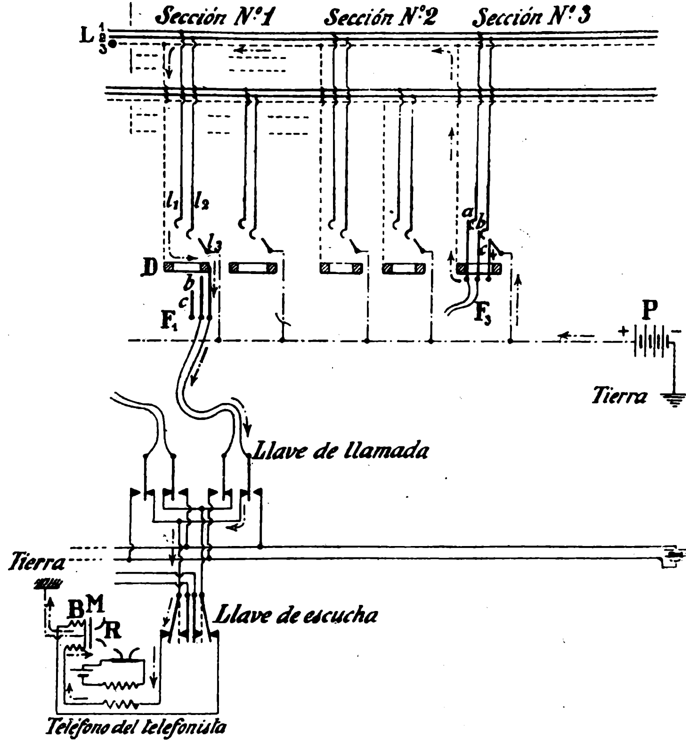


Fig. 108.

bién muelle (fig. 108); todas las lengüetas de los jacks de todas las secciones están unidas a una misma línea que llega al polo + de una pila *P*, cuyo polo — está unido a tierra. Además, las boquillas *D* de todos los jacks de una misma línea están unidas eléctricamente

a un mismo hilo. Por consiguiente, detrás del cuadro de la central hay tres hilos por línea; dos de ellos, 1 y 2, prolongados por fuera de la central hasta la estación del abonado, y sobre los cuales están derivadas las dos láminas l_1 y l_2 de todos los jacks correspondientes; y el tercer hilo 3, limitado en la central, une todas las boquillas de estos jacks.

Cada una de las clavijas lleva tres láminas de desigual longitud, de las cuales las dos más largas *a* y *b* están unidas a los conductores del cordón y se apoyan sobre l_1 y l_2 cuando la clavija está introducida en la boquilla sin establecer contacto con esta boquilla; la más corta *c* no comunica con ningún conductor, pero está en contacto con la boquilla. Finalmente, el carrete *B* del receptor telefónico *R* de cada telefonista está unido a tierra por uno de sus puntos *M*.

Supongamos, por ejemplo, que la línea *L* de un abonado haya sido puesta en comunicación por el telefonista de un cuadro de una sección n_3 mediante la clavija F_3, y que un abonado cuyo jack particular pertenece a la sección n_1 pide una comunicación con esta misma línea *L*. Antes de introducir una clavija de llamada en el jack general de la línea *L*, situada en la sección n_1, el telefonista toca con la cabeza de esta clavija F_1, es decir, con la lámina *a*, el anillo del jack general de *L*. En este momento se cierra la pila *P* sobre el circuito formado por la lámina *c* de la clavija F_3, el hilo 3 de la línea *L*, la lámina *a* de la clavija F_1, una lámina de la llave de llamada y de la llave de escucha, el secundario del transformador del teléfono del telefonista, el carrete del receptor y la tierra. Cada contacto de la cabeza de la clavija F_1 con la boquilla *D* producirá en el teléfono del telefonista un ruido un toque, que le indicará que la línea *L* está ocupada. La clavija F_1 no se introducirá para dar la comunica-

ción con L, sino después de haber repetido la prueba precedente sin oír ningún ruido en el receptor R.

Batería central. — La instalación de la batería central en las estaciones centrales tiene las siguientes ventajas:

1.ª Suprimir la pila de llamada del abonado;

2.ª Suprimir la llave de llamada en casa de los abonados; basta descolgar el receptor del aparato para producir la señal de llamada;

3.ª Suprimir la indicación por el abonado del fin de conversación; basta colgar el receptor para que se produzca la señal de fin.

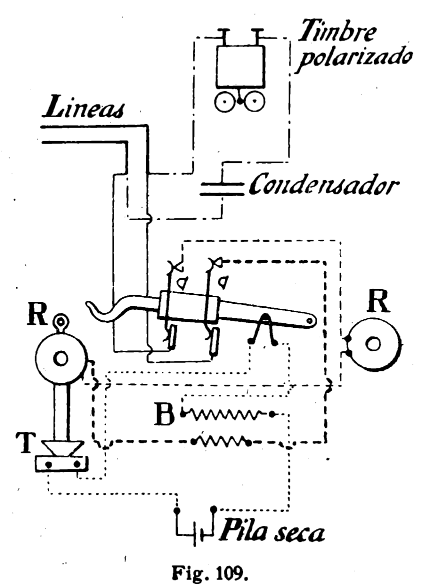


Fig. 109.

Cuando un abonado descuelga el receptor del gancho conmutador de su aparato, se enciende una *lámpara de llamada* correspondiente al número del abonado. Otra lámpara de color diferente se enciende también en la central cuando habiendo terminado la conversación cuelga el abonado su receptor del gancho del aparato.

Sin entrar en la descripción de la central daremos el esquema de una estación de abonado (fig. 109).

En derivación sobre las líneas que llegan a la estación se monta un timbre polarizado de gran resistencia y en serie con él un condensador.

La batería central, que es una batería de acumuladores de unos 24 volts, está unida constantemente a las líneas de los abonados.

Cuando se baja el gancho conmutador no pasa corriente por los receptores, por estar cortados los circuitos, y por el timbre tampoco pasa corriente a causa del condensador. Al contrario, cuando el abonado descuelga el receptor, sube el gancho y las líneas se unen entre sí por los carretes de los receptores y el secundario del carrete *B*; la batería central se encuentra entonces cerrada sobre un relevador de llamada, que cierra a su vez otra batería de acumuladores sobre la lámpara del abonado.

Cuando la central quiere llamar al abonado, hace pasar por la línea la corriente alterna de un alternador; esta corriente pasa por el condensador y por el timbre.

Durante la conversación, las corrientes inducidas que circulan por las líneas no son alteradas por el circuito del timbre, a causa de la gran reactancia y resistencia de este circuito.

Redes automáticas

Si una red automática urbana es muy importante se divide en un cierto número de sectores; en cada sector todas las líneas convergen en una central que se ha previsto para servir, en general, a 10000 abonados.

De esta manera los números de llamada no tienen más de cuatro cifras, además de la indicación de la central que los sirve. Esta última es designada con una, dos o tres letras, según el número de centrales que tenga la red.

El esquema de una comunicación se establece como sigue:

Si, por ejemplo, las centrales están designadas con las dos primeras letras de su nombre, el que llama

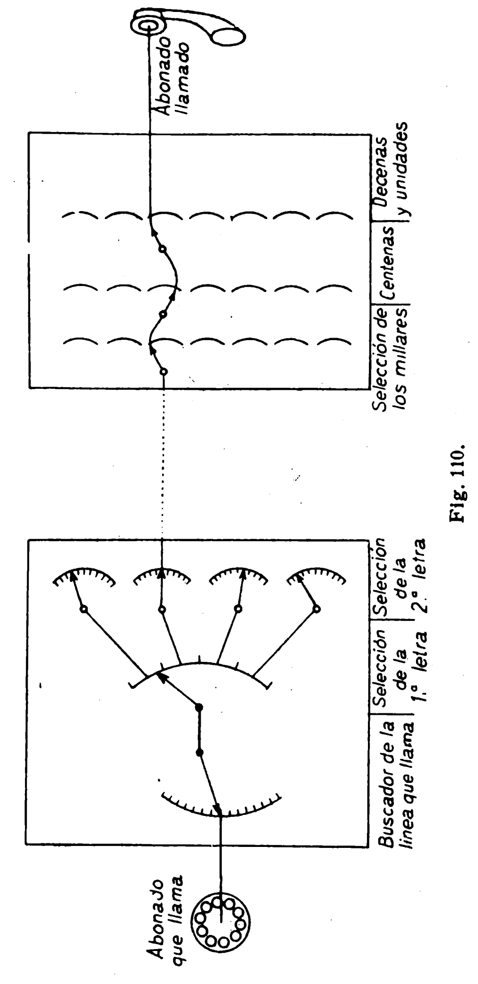


Fig. 110.

envía primeramente, por intermedio de su cuadrante, las impulsiones correspondientes a las dos primeras letras de la central llamada.

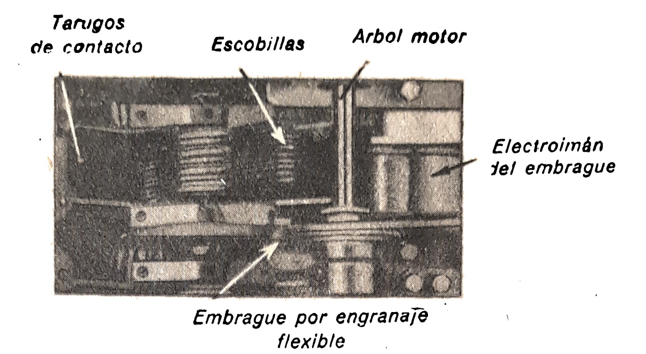


Fig. 111. — Vista de un buscador montado en su marco.

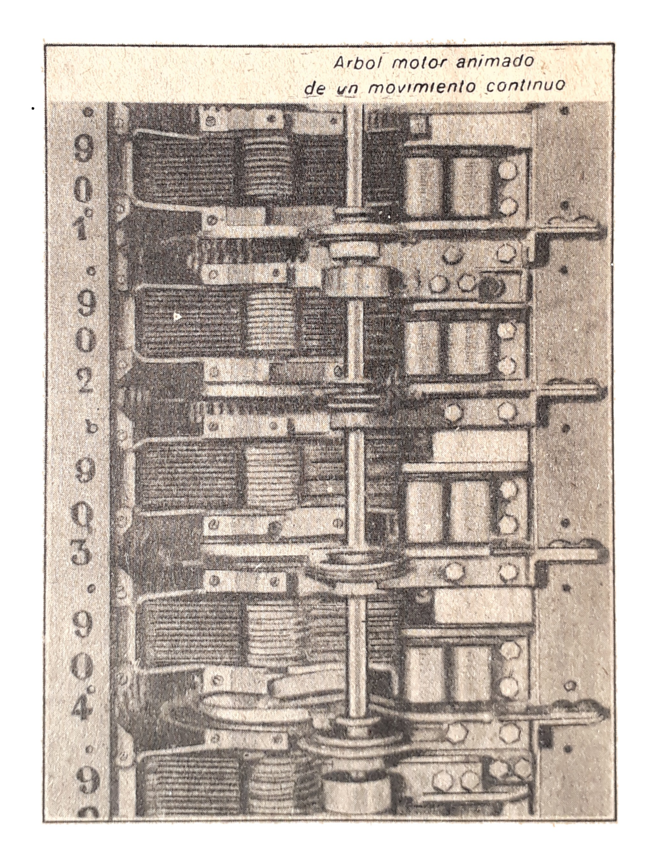


Fig. 112. — Batería de buscadores vista de frente.

Entonces su línea está prolongada hasta esta central. A continuación envía las cuatro cifras del número de su interlocutor, y entonces queda puesto en comunicación con él.

Para la red de París ha sido adoptado el sistema Rotary. Sin embargo, los conmutadores giratorios no se accionan de la misma manera que en las llamadas particulares de pequeña capacidad, pues se utiliza un mando por engranaje flexible (fig. 111).

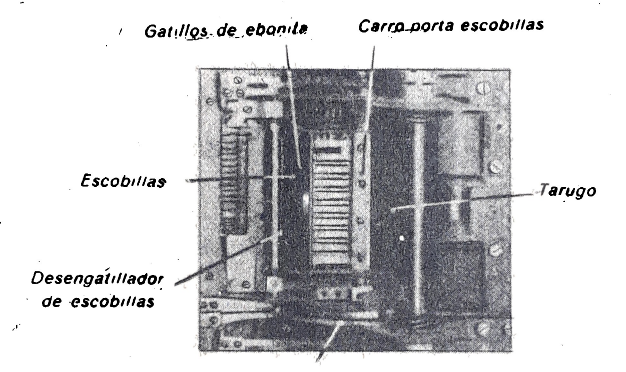


Fig. 113. — Vista de un selector final (conectador).

Un árbol motor que lleva un piñón, gira sin cesar con velocidad constante. Por otra parte, sobre el eje del conmutador está montada una rueda dentada flexible que puede engranar con el piñón.

Si no hay llamada, esta rueda es desviada por una palanca, y por tanto no puede entrar en acción. Pero la palanca puede ser levantada por un electroimán y, por consiguiente, basta enviar una corriente al mismo para que la rueda dentada tome su posición normal y gire al engranar con el piñón.

CAPÍTULO III

Instalación de timbres y de teléfonos

Una instalación de timbres o de teléfonos comprende: 1.°, una o varias cajas de pilas; 2.°, aparatos de llamada (botones, peras, tiradores, magnetos); 3.°, aparatos de recepción de las señales (timbres, cuadros indicadores, relevadores) y teléfonos; 4.°, aparatos de protección contra las descargas atmosféricas (pararrayos), en el caso de que la instalación esté unida a una línea aérea cuyo desarrollo alcance a 150 metros; 5.°, una línea que una convenientemente todos estos aparatos.

Pilas. — El tipo más empleado es el elemento Leclanché, que es especialmente utilizado cuando se trata de producir corrientes intermitentes y de poca duración. Su entretenimiento es fácil; consiste en agregarle agua de vez en cuando para mantener su nivel aproximadamente constante, limpiarlo cada seis meses por lo menos, quitar las sales adheridas y comprobar los tornillos de presión. Cuando es necesario, se vacía completamente el vaso de vidrio, se lava el vaso poroso con agua caliente y se vuelve a cargar el elemento disolviendo en una cantidad conveniente de agua 80 a 100 gramos de clorhidrato amónico; se

vierte, decantando, la solución en el vaso de vidrio y se le agrega agua hasta el nivel preciso.

Se sabe que una pila funciona en las mejores condiciones de rendimiento cuando su resistencia interior es igual a la del circuito sobre que está cerrada.

Cuando el circuito es poco resistente (circuito local, primario de un carrete de inducción), se emplean únicamente pilas de saco o con placa de zinc; en cambio, la pila ordinaria de vaso poroso y barra de zinc debe utilizarse para los micrófonos de circuito primario y para los circuitos de línea.

En los casos particulares en que la pila ha de emplearse de un modo continuo durante un cierto tiempo o para llamadas muy frecuentes o repetidas, será necesario utilizar elementos que produzcan corriente más constante que el elemento Leclanché; por ejemplo, el elemento Daniell o Lalande (con óxido de cobre).

Aparatos de llamada.—Antes de montar un aparato de llamada es conveniente comprobar que las paletas de los dos muelles están bien colocadas una frente a otra y sólidamente fijadas; que los muelles pueden reaccionar con intensidad suficiente (para asegurar las llamadas sucesivas) sobre el botón o el peso de la empuñadura en que termine el cordón de llamada.

Los aparatos destinados a las puertas exteriores deben estar muy bien cuidados, el tirador o el botón debe estar bien ajustado y las dos paletas perfectamente aisladas. Es muy útil disponer de aparatos en que los contactos resbalen unos sobre otros, pues se conservan siempre en excelente estado.

Aparatos de protección. — Se llama aparatos de protección a los dispositivos que permiten evitar que los aparatos telefónicos, cuyas bobinas son frágiles, se

deterioren a causa de las corrientes de gran intensidad que pueden circular accidentalmente por las líneas a las que están conectados. Estas corrientes pueden ser debidas a contactos entre la línea y los hilos de la red de alumbrado o de fuerza, a la caída de un rayo sobre las líneas aéreas, o también a la inducción producida por un transporte de energía cercano o a fenómenos eléctricos debidos al campo magnético terrestre.

Por lo que concierne a las descargas atmosféricas, diremos que el rayo es la chispa formada por la descarga de un vasto condensador cuyas armaduras están constituídas por dos nubes o por una nube y la tierra.

Esta descarga es *oscilante,* efectuándose por una serie de corrientes alternas de gran intensidad y sobre todo de frecuencia muy grande. Por consiguiente, las líneas aéreas que se encuentran en la región donde se produce el rayo, en una zona de unos 2 ó 3 kilómetros, se cargan por inducción. Esta carga busca para ir al suelo el camino de menor resistencia, y como la descarga que resulta es también oscilante, se produce en forma de corrientes alternas de gran frecuencia. Ahora bien, se sabe que la resistencia que presenta un circuito al paso de una corriente alterna es la impedancia de este circuito, cuyo valor es:

$$\sqrt{R^2 + 4\,\pi^2\,L^2\,N^2},$$

siendo R su resistencia ohmica, L su coeficiente de autoinducción y N la frecuencia de la corriente. Por lo tanto, por muy pequeña que sea la autoinducción de alguna parte de este circuito, su reactancia $2\pi NL$ es grande, a causa del elevado valor de N, y por consiguiente su impedancia es enorme.

Luego la descarga se efectuará a través de las partes de gran resistencia óhmica, pero no por con-

ductores de poca resistencia pero que tengan autoinducción.

Un pararrayos está constituído por un aparato que une la línea con tierra por medio de una resistencia óhmica muy grande, pero sin antoinducción, y esta resistencia óhmica es suficiente para no ocasionar una derivación a tierra de la corriente normal. Por ejemplo, estará formado el pararrayos por dos conductores metálicos A, B, separados por un dieléctrico que puede ser el aire; uno está unido a la línea y èl otro a tierra. Si se produce una descarga atmosférica, se rompe el dieléctrico que separa los dos conductores y dicha descarga pasa al suelo en forma de chispa disruptiva (fig. 114).

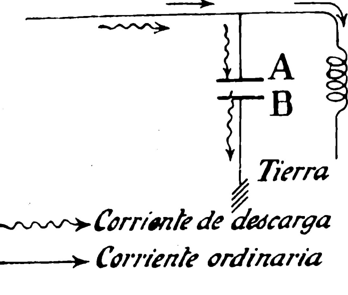


Fig. 114.

También puede preverse un conjunto constituído por fusibles y un pararrayos; el pararrayos conduce a tierra las corrientes peligrosas ocasionando la fusión de los fusibles y produciendo, por tanto, el aislamiento de los aparatos.

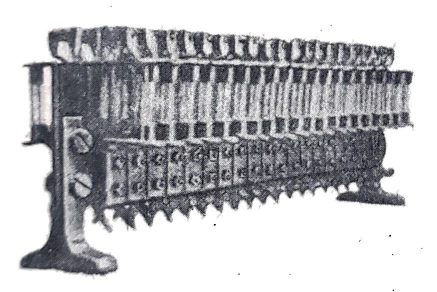


Fig. 115. — Grupo de fusibles y pararrayos.

En las estaciones telefónicas centrales, en las que convergen un número importante de líneas, se adoptan aparatos de protección lo menos voluminosos posible (figura 115).

A veces los fusibles van acompañados de bobinas térmicas destinadas a cortar la corriente bajo la acción de sobreintensidades débiles pero de larga duración.

En los pararrayos, la chispa salta entre dientes de cobre o entre dos placas de carbón.

De una manera general, los fusibles ordinarios funcionan con una corriente de 3 amperes; las bobinas térmicas funcionan a 0,25 amperes aproximadamente. En cuanto a los pararrayos de carbón diremos que están regulados para funcionar bajo una tensión de 1200 volts aproximadamente y los pararrayos de peine bajo una tensión de 2000 volts.

Por último, se emplean también limitadores de tensión de gases raros, constituídos por tubos de vidrio llenos de gas rarificado y que encierran dos electrodos metálicos (figura 116). Uno de estos electrodos está unido a la línea y el otro a tierra, o bien cada uno de ellos está conectado a uno de los hilos de la línea. El espacio que separa estos electrodos deja escapar las sobretensiones antes de que puedan ser peligrosas para los aparatos telefónicos o el personal. Normalmente este espacio es aislante, pero cuando la diferencia de potencial entre ambos electrodos alcanza cierto valor el gas se ioniza, se vuelve conductor y entonces deja pasar la descarga, la cual cesa así que la diferencia de potencial ha vuelto a recobrar su valor normal. Por tanto, estos limitadores de tensión no son, como los fusibles o ciertos pararrayos, deteriorados por la descarga y no han de ser reemplazados después de haber funcionado.

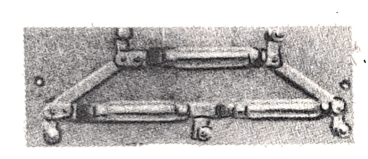


Fig. 116.
Limitador de tensión, de gas.

MONTAJE DE LOS PARARRAYOS. — Es fácil comprender el montaje de los pararrayos en los distintos casos que pueden presentarse. El esquema de la figura 117

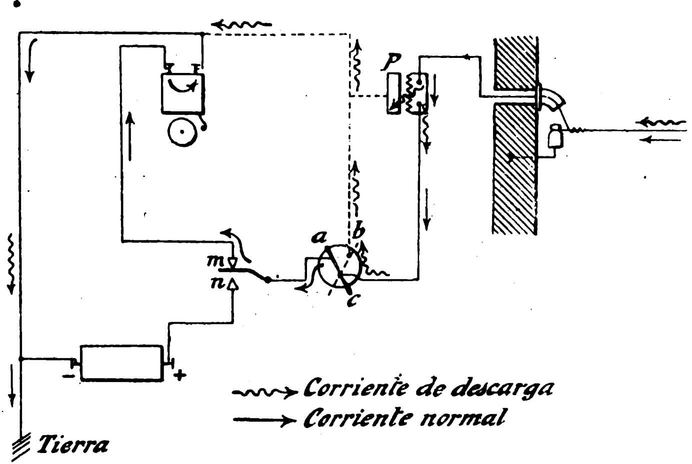


Fig. 117.

da el montaje de dos timbres lejanos. Las dos estaciones son idénticas; en tiempo ordinario la manivela del conmutador *c* está sobre el contacto *a*, pudiéndose así recibir una señal cuando la lámina del interruptor está sobre el contacto *m*, y enviarla cuando se baja sobre el contacto *n*. El pararrayos *p* protege a la estación contra una descarga atmosférica. En tiempo de tempestad se aumentan las condiciones de seguridad poniendo la manivela del conmutador sobre el contacto *b*, quedando así cortada la comunicación de los aparatos con tierra y poniendo directamente la línea a tierra.

El esquema de la figura 118 da el montaje de un pararrayos que protege una estación telefónica contra las descargas que pueden ser transmitidas por las dos líneas.

El esquema de la figura 119 representa la instalación de un conjunto de pararrayos que protegen un

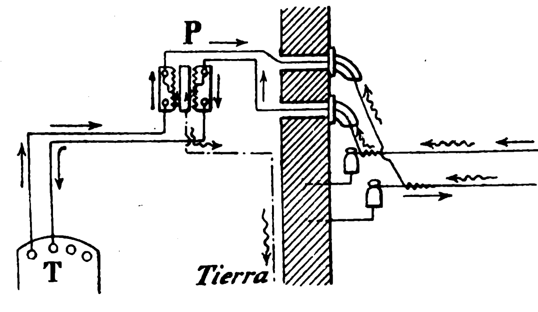


Fig. 118.

grupo de receptores alimentados por cuatro líneas, con vuelta por tierra. En caso de tempestad, se ponen mediante el conmutador *C* las cuatro líneas a tierra.

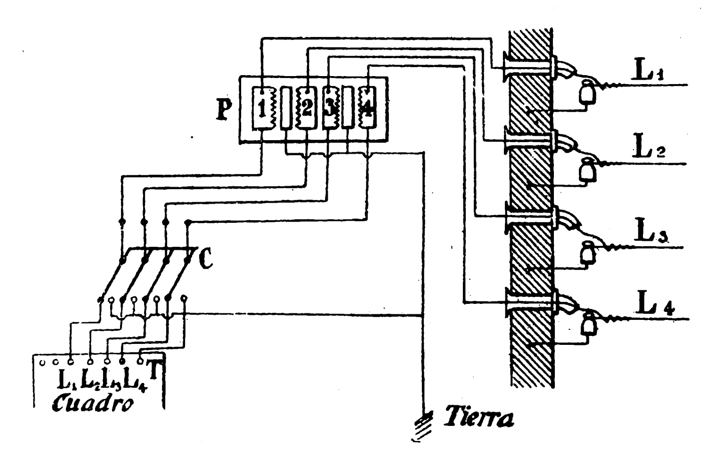


Fig. 119. — Instalación de pararrayos sobre diversas líneas, con inversor de puesta a tierra.

Tomas de tierra. — Las tomas de tierra deben hacerse con gran cuidado, de modo que se establezca el

mejor contacto posible entre el conductor y la tierra. Para obtener este resultado se refuerza el conductor antes de la toma de tierra por medio de un cable de cobre estañado; para las tomas de tierra se utilizan a ser posible las tuberías de agua o de gas (figura 120); el cable se suelda a la tubería, que debe haberse limpiado perfectamente antes de hacer la soldadura.

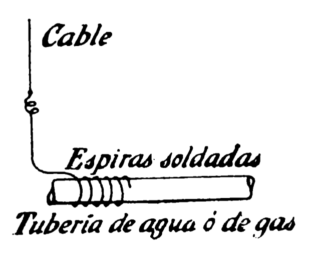


Fig. 120.

Si no es posible utilizar tuberías, se sueldan los extremos de los hilos que componen el cable a una placa de cobre de 1 metro cuadrado de superficie, aproximadamente, y de 1 a 2 milímetros de espesor, que se sumerge a ser posible en un río o en un pozo a una profundidad de 50 centímetros por lo menos (fig. 121).

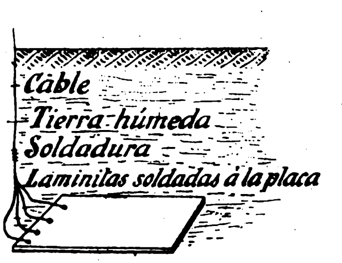


Fig. 121.

Si no hubiera río ni pozos en los alrededores del edificio, se entierra la placa a una profundidad de 1 metro, por lo menos, en un sitio tan húmedo como sea posible. En la época de los calores fuertes, es conveniente mantener la tierra en un estado de humedad suficiente, regándola con mucha frecuencia.

Los hilos del cable se dividen en cuatro o cinco ramales terminados en ojetes, apretados entre dos redondelas galvanizadas por una tuerca estañada de antemano. El conjunto que así resulta se suelda a la placa y se recubre con soldadura.

En todos los casos hay que procurar que el cable de toma de tierra no se pueda oxidar y por consi-

guiente no se rompa al cabo de un tiempo más o menos largo.

Conductores. — Los conductores son tubos de cobre cuyo diámetro es de $^{9}/_{10}$, $^{10}/_{10}$ u $^{11}/_{10}$ de milímetro, aislados por una capa de gutapercha recubierta por un revestimiento de algodón o de seda. Este revestimiento se hace de varios colores, de modo que se pueda acomodar o combinar con los matices del decorado.

En las habitaciones o lugares algo húmedos se emplean hilos cuya cubierta de algodón está parafinada; en los sitios muy húmedos se recubren además de un trenzado embreado.

Para las canalizaciones exteriores o en locales extremadamente húmedos, es preciso recurrir a hilos colocados dentro de tubos de plomo; si son varios los conductores, se hacen sus revestimientos de colores diferentes para poderlos distinguir en sus extremos.

Para el exterior, se emplean hilos de bronce silicioso, sostenidos generalmente por aisladores de porcelana o de vidrio; para los timbres se pueden emplear, en algunos casos, hilos de hierro galvanizado.

Plano de la instalación. — Antes de empezar una instalación, se determina el emplazamiento de los aparatos y el recorrido de los hilos.

Las pilas se colocan, a ser posible, en un sitio en que la temperatura no alcance valores muy elevados, para evitar la rápida evaporación del agua. Si hay que colocarlas en un sitio húmedo, un sótano por ejemplo, es conveniente recubrir los bornes y los empalmes con una sustancia grasa, o con parafina o barniz, de modo que se impida la acción oxidante del aire húmedo.

Los aparatos (timbres, cuadros, teléfonos, etc.) no deben fijarse sobre una pared húmeda; si no hay más

remedio que hacerlo así, hay que colocarlos separados de la pared, por medio de tacos de madera pintada, o mejor aun por cuatro aisladores de porcelana. Se procura no colocar los aparatos en tabiques sometidos a sacudidas frecuentes, porque podrían producirse movimientos en los tornillos de regulación que impedirían el funcionamiento de los timbres.

Los sitios para colocar los aparatos y los botones o llaves de llamada están determinados en cada caso por las condiciones de mayor comodidad para su empleo.

El recorrido de las líneas está determinado por la disposición de las paredes, puertas, etc.; se procura disimularlas todo lo que se pueda y reducir los gastos de la instalación. Como el precio de los hilos es relativamente reducido, será ordinariamente más económico aumentar el recorrido de los hilos para evitar el tener que abrir agujeros en la pared, y aprovechar el ángulo de una puerta, de una imposta, etc.

Colocación de la línea. — Los conductores se fijan sobre las paredes por medio de horquillas americanas, de ganchos esmaltados o de horquillas aisladas de dimensiones convenientes (figura 122).

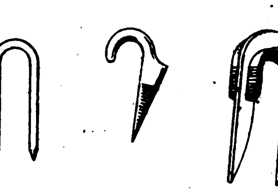


Fig. 122.

Las horquillas americanas son de hierro; están galvanizadas, estañadas, barnizadas o cobreadas y tienen el inconveniente de poderse oxidar al cabo de algún tiempo, lo cual destruye poco a poco el aislador de los hilos y produce cortocircuitos. Por consiguiente, sólo deben emplearse en los sitios completamente secos, siendo muy conveniente recubrir las horquillas o los

conductores con una cinta estrecha de tela en el punto de contacto.

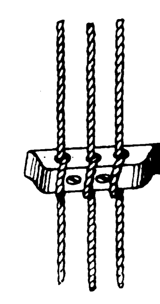
Los ganchos esmaltados hay que clavarlos con mucho cuidado mediante un botador, de modo que no se rompa el esmalte.

Las horquillas aisladoras son de latón, guarnecidas de un aislador, generalmente una pequeña hoja de fibra: no cortan la cubierta aisladora de los hilos, pero pueden producir cortocircuitos.

Los ganchos u horquillas se emplean cuando hay que fijar un haz de varios hilos que siguen el mismo recorrido. En este caso, se utilizan hilos de varios colores y se indica en el plano de la instalación el objeto de cada uno de ellos. Se reúnen estos hilos en un mismo manojo y se retuercen, introduciendo sus extremos en las mandíbulas de un berbiquí americano que se hace girar manteniendo fijos los otros extremos de los hilos; así se obtiene un cordón perfectamente regular que permite hacer una buena instalación.


Fig. 123.

Las horquillas o ganchos deben clavarse con cuidado, pues por muy poca resistencia que presente la pared o la madera, se doblan o aplastan, perdiendo el revestimiento que los protege contra la oxidación o su guarnición aisladora, de modo que pueden provocar roturas de hilos o cortocircuitos. Se clavan con la herramienta representada en la figura 123.


Fig. 124.

Cuando el número de hilos que siguen un mismo recorrido es poco elevado, se emplean pequeños aisladores de hueso de varios colores. Si hay dos o tres conductores formando un solo cordón, se abre el

cordón y se introduce el aislador, que se fija sobre la pared por medio de una puntita de cabeza redonda.

Cuando se quiere mantener separados todos los hilos, se emplean tacos de madera agujereados.

Para mantener los hilos bien tirantes, se pasan dos veces por cada agujero, dándoles una vuelta sobre el taco (fig. 124). Es más fácil emplear tacos divididos en dos partes; los hilos se colocan en las muescas de la primera, fijada de antemano en la pared, y después se aprieta la segunda parte mediante uno o varios tornillos, ejerciendo mientras tanto sobre los hilos una tracción conveniente (fig. 125).

Fig. 125.

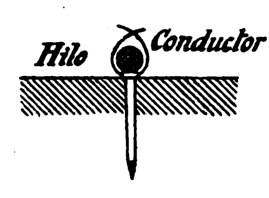
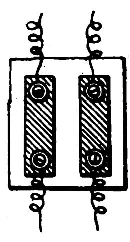


Fig. 126.

Otro procedimiento para fijar los conductores consiste en clavar en la pared, de trecho en trecho, clavos de cabeza redonda, alrededor de los cuales se hace un nudo con un hilo fuerte; el conductor se coloca por encima de las cabezas de los clavos y se amarra con el hilo, cortando después los extremos de éste (fig. 126).

Derivaciones. — Para derivar un conductor de otro, se procede de la manera siguiente. Se corta el algodón en el punto en que hay que hacer el empalme, se desarrolla con cuidado en una longitud de 1 a 2 centímetros y se raspa el cobre; se raspa en 4 ó 5 centímetros el extremo del hilo de derivación y se arrolla este extremo alrededor del primer hilo raspado, formando espiras muy apretadas unas contra otras y contra el hilo sobre que están arrolladas, sujetándolas después con

unas pinzas para que no puedan desarrollarse. Se cubre este empalme con una tira muy estrecha de caucho natural, se arrolla por encima el hilo de algodón que se había desarrollado al principio, y se hace un nudo en el extremo para que no pueda desarrollarse. De esta manera se obtienen empalmes perfectos.


Fig. 127.

Las derivaciones se hacen en algunos casos por medio de enlaces, formados por láminas de latón provistas de tornillos de amarre y fijadas sobre soportes de madera (figura 127).

Los hilos que llegan a los bornes de los aparatos, después de haber sido raspados y haber anudado el hilo de cubierta para evitar las hilachaduras, se arrollan sobre sí mismos para que puedan cambiarse de sitio los aparatos sin ejercer sobre los conductores una tensión excesiva capaz de romperlos o desatarlos.

Conductores dentro de tubos. — Si la instalación es de alguna importancia, es cómodo pasar los hilos por dentro de tubos aisladores, hechos de cartón impregnado de resinas especiales y recubiertos de una vaina de latón o mejor aun de acero emplomado. Con estos tubos se disimulan muy bien los conductores, colocándolos bajo la tapicería o papeles de las habitaciones; el modo de emplearlos se describirá más adelante al tratar de las instalaciones de alumbrado.

Paso a través de paredes y suelos. — Cuando los conductores tienen que atravesar paredes o techos, es preciso protegerlos con tubos.

Conductores aéreos. — Los conductores aéreos se montan sobre aisladores de vidrio o de porcelana.

Enlace de dos instalaciones, una interior y otra aérea. — El hilo que establece este enlace atraviesa la pared dentro de una pipa de porcelana y se arrolla alrededor del conductor exterior o bien se une por medio de una tuerca de latón dividida en dos partes, unidas fuertemente entre sí por tornillos (fig. 128).

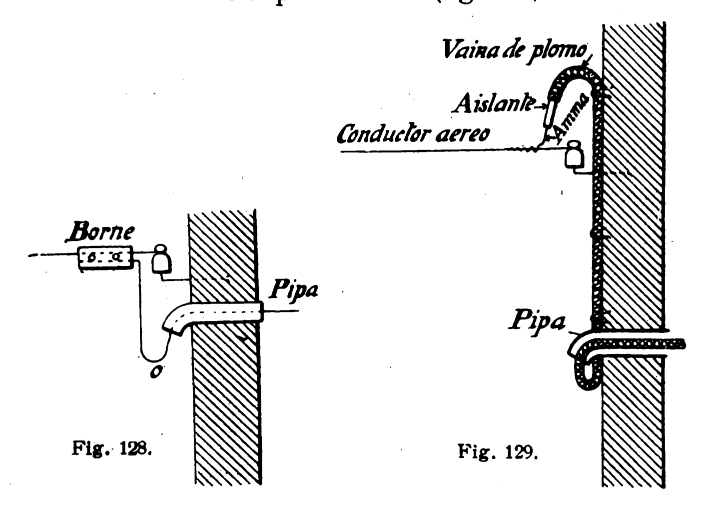


Fig. 128. Fig. 129.

Antes de entrar el conductor en la pipa, se dobla del modo indicado en la figura, para que las gotas de agua que queden suspendidas en el hilo vayan a la parte inferior *o* y caigan al suelo sin penetrar en el interior de la pipa.

Algunas veces se emplean hilos bajo cubierta de plomo que parten de los conductores exteriores, y rasando las paredes penetran por las pipas en las casas. Se corta la vaina de plomo en los dos extremos en unos 3 ó 4 centímetros; el extremo exterior que está unido a la línea se dobla en *cuello de cisne* con la concavidad hacia abajo, de manera que la humedad no pueda penetrar entre la vaina de plomo y la cubierta aisladora (fig. 129).

CAPITULO IV

Distribución de la energía eléctrica

La energía eléctrica se distribuye á las casas de los particulares por fábricas centrales, en forma de corriente continua o de corrientes alternas.

Corriente continua. — a) *Sistema de dos hilos.* — La fábrica generadora mantiene entre dos cables aéreos o subterráneos, siguiendo las calles, una diferencia de potencial constante. Sobre estos cables se derivan conductores que por medio de un interruptor, de un contador y de un cortacircuito, se unen a la instalación interior. La tensión entre estos cables es generalmente de 110 ó 220 volts.

b) *Sistema de hilos múltiples.* — Los modos de distribución por hilos múltiples más generalizados son los sistemas de tres y de cinco hilos.

En el sistema de tres hilos, una red de tres conductores pasa por las calles y caminos. Estos tres conductores parten de los polos de dos máquinas idénticas cuyos inducidos, montados en el mismo árbol, son movidos por un mismo motor. Los inducidos de las dos dinamos están montados en serie.

De los dos polos extremos + y — salen dos de los tres conductores, que son los *hilos extremos;* del polo

común sale el otro conductor, que es el *hilo común* o *neutro*.

Cada uno de los hilos extremos forma con el neutro un *puente;* el *puente positivo* está formado por el hilo extremo unido al polo + de las dos máquinas y el hilo neutro; el otro hilo extremo y el neutro forman el *puente negativo* (fig. 130).

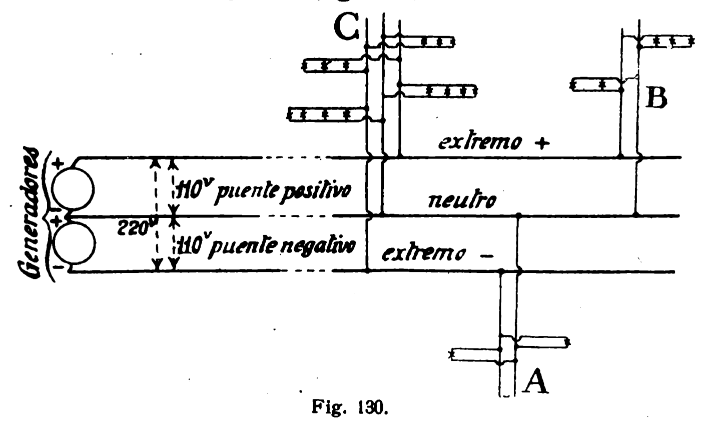


Fig. 130.

Entre los conductores de cada puente se mantiene constante la misma diferencia de potencial, generalmente de 110 ó 220 volts. De modo que entre los extremos la tensión es doble de la de cada puente, es decir, 220 ó 440 volts.

Si la instalación no es de gran importancia, se toma sobre uno solo de los dos puentes y se establece como si se hubiera hecho tratándose de una distribución por dos hilos (*A* y *B*).

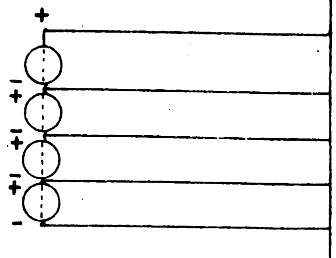


Fig. 131.

Cuando la potencia gastada por la instalación alcanza un determinado valor fijado por un reglamento,

la instalación interior deberá tomarse sobre los dos puentes y las lámparas han de repartirse, a ser posible, en igual número para ambos puentes (*C*).

En el sistema de cinco hilos, hay cuatro puentes y cuatro máquinas: se tomará una instalación, según su importancia, sobre uno o varios puentes (fig. 131).

Corrientes alternas.—*Corrientes monofásicas.*—La instalación se hace exactamente como en el caso de una

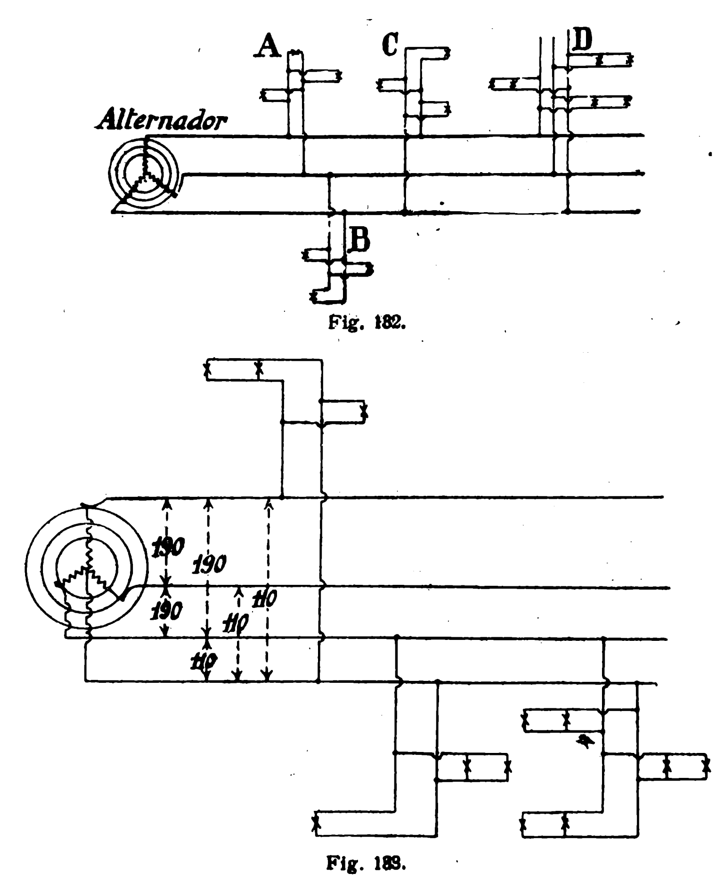


Fig. 182.

Fig. 183.

distribución por corriente continua con dos hilos, derivándola sobre dos conductores entre los cuales mantiene la central una tensión eficaz constante.

Corrientes trifásicas. — La distribución se puede hacer por tres o por cuatro hilos.

En el primer caso (fig. 132) las instalaciones se derivan sobre una sola fase si son de poca importancia (*A*, *B*, *C*); pero cuando la potencia absorbida alcanza un cierto valor, se reparten los focos luminosos (*D*) todo lo igualmente posible sobre las tres fases.

En los casos de distribución con cuatro hilos, el cuarto hilo sale del centro de la estrella generatriz y las instalaciones se derivan entre este hilo y uno cualquiera de los otros tres.

Si la tensión eficaz entre el cuarto hilo y cada uno de los otros tres es igual a 110 volts, hay entre cada fase una tensión igual a $110\sqrt{3} = 190$ volts (fig. 133).

CAPÍTULO V

Instalaciones interiores de alumbrado

I. Principales unidades fotométricas

1.° **Intensidad luminosa.** — Sin entrar en las hipótesis relativas a la naturaleza de la luz, nos limitaremos a considerar la intensidad luminosa de un manantial como una medida de su *potencia de iluminación* en una dirección dada.

La unidad es la *bujía internacional:* es la intensidad luminosa de una cierta lámpara eléctrica patrón construída y alimentada en condiciones bien determinadas.

Observemos que para un manantial dado, la intensidad luminosa no es, en general, la misma en todas las direcciones.

2.° **Iluminación.** — El efecto útil de la iluminación depende no solamente de la intensidad luminosa del manantial sino también de la distancia que separa a éste de la superficie que se ha de iluminar. Se ha dado el nombre de *lux* a la iluminación de una superficie situada a un metro de un manantial de *una bujía*.

3.° **Flujo luminoso.** — Es la cantidad de luz que un manantial envía sobre una superficie dada.

Se dice que un manantial emite un flujo de un *lumen* cuando estando concentrada toda su luz sobre una superficie de un metro cuadrado produce en la misma una iluminación de *un lux*.

Determinemos cuál es el flujo luminoso total emitido por una lámpara que tenga *en todas las direcciones* una intensidad luminosa de una bujía. Supongámosla colocada en el centro de una esfera que, por ejemplo, tenga un metro de radio (y, por tanto, una superficie de 12,57 m^2). Esta lámpara produce una iluminación uniforme de 1 lux que se extiende sobre una superficie de 12,57 m^2 y, por tanto, el flujo luminoso producido es de 12,57 lumens. Este resultado es naturalmente independiente de las dimensiones de la esfera tomada como ejemplo.

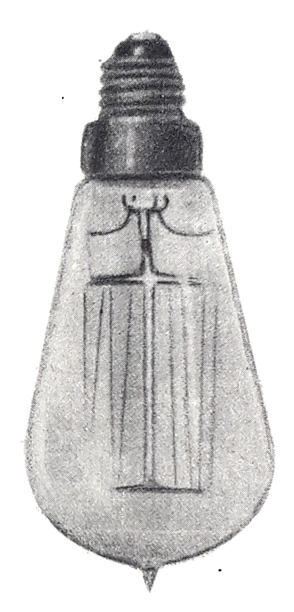


Fig. 134.—Lámpara patrón de filamento metálico. La intensidad luminosa se toma en dirección perpendicular al plano del filamento.

4.° **Brillo.** — Se llama *brillo* de un manantial a la relación entre su intensidad luminosa y su superficie aparente. La unidad es la bujía por centímetro cuadrado y ha recibido el nombre de *stilb*. Mientras que el brillo de la llama de una bujía ordinaria es de 0,5 stilb, la de una lámpara eléctrica de vacío alcanza 200 stilbs y la de una lámpara de atmósfera gaseosa de 100 watts (filamento helicoidal) es de 580 stilbs.

Estos brillos tan grandes son peligrosos para la vista

y, por tanto, es preciso tener cuidado de aumentar la superficie aparente de los manantiales, ya sea deslustrando las bombillas, ya colocándolas en difusores apropiados.

II. Diversos modos de alumbrado eléctrico

1.° **Lámpara de arco.** — Cuando se establece una diferencia de potencial suficiente entre dos electrodos colocados en el aire se produce entre ellos una descarga.

Si los electrodos son apropiados y si el manantial de energía es capaz de suministrar una corriente de intensidad suficiente, la descarga puede mantenerse de una manera continua y dar lugar al fenómeno que ha recibido el nombre de *arco eléctrico*.

Las lámparas de arco utilizadas para el alumbrado tienen sus electrodos constituídos por lápices de carbón a los que a veces se incorporan ciertas sustancias minerales destinadas a modificar el matiz de la luz del arco. Pueden funcionar con corriente alterna, pero entonces son menos estables y dan menor rendimiento que con corriente continua.

Si la combustión se efectúa al aire libre, la tensión entre los carbones debe ser de 35 a 45 volts. El consumo específico es del orden de 1 watt por bujía para electrodos de carbón puro y de $^1/_2$ watt para electrodos mineralizados.

La combustión puede hacerse también en vaso cerrado casi herméticamente, y en este caso, por el motivo de que el oxígeno se halla enrarecido, el desgaste de los carbones es menos rápido: de ocho a diez veces más lento que en los arcos al aire libre, o sea unos 2 milímetros por hora. La tensión entre carbones debe ser entonces de 75 a 85 volts.

Si la lámpara ha de ser alimentada por un sector

de 110 ó 220 volts, es necesario prever un reostato para bajar la tensión al valor deseado, o bien una bobina de self o un transformador en el caso de ser la corriente alterna.

Las lámparas de arco deben ser completadas con un dispositivo mecánico que permita: 1.°, poner en contacto los dos carbones para cebar el arco; 2.°, mantener después constante la separación de los carbones a pesar de su desgaste.

El dispositivo siguiente es el más satisfactorio:

El carbón superior es fijo y el carbón inferior está montado sobre un núcleo de hierro móvil en el interior de una bobina de dos arrollamientos, uno de los cuales está montado en serie y el otro en derivación sobre el arco, y los sentidos de enrollamiento son tales que sus acc nes sobre el núcleo son opuestas.

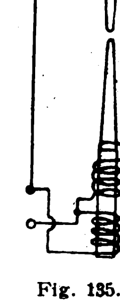


Fig. 135.

En estado de reposo los carbones son mantenidos en mutuo contacto mediante un muelle. Cuando a los mismos se envía la corriente, la bobina en serie los separa y ceba el arco; después, al aumentar la longitud del arco, aumenta asimismo la diferencia de potencial entre los electrodos y en su consecuencia la corriente crece en el electroimán en derivación, el cual actúa entonces aproximando los carbones.

La necesidad de dispositivos de esta naturaleza, la obligación de reemplazar con mucha frecuencia los carbones, la falta de fijeza de la luz y el peligro de incendio son serios inconvenientes de que adolece la lámpara de arco. Por estas razones se emplea cada día menos, máxime sabiéndose construir hoy día lámparas de incandescencia para las grandes intensidades luminosas que antes sólo podían obtenerse con los arcos.

Sin embargo, todavía se utilizan algunas veces para el alumbrado de avenidas, estaciones de ferrocarril, grandes locales industriales, etc., y también cuando se tiene necesidad de manantiales luminosos de gran intensidad y pequeña superficie. La lámpara de arco ha tenido que abandonarse para el alumbrado de los estudios cinematográficos, a causa del chirrido que produce y que es suficiente para impresionar los aparatos registradores del sonido.

2.° **Alumbrado por luminiscencia.** — Tomemos un tubo de vidrio que encierre un gas enrarecido y que en cada extremidad lleve soldado un electrodo metálico; si unimos estos electrodos a un manantial de tensión suficientemente alta se produce en el tubo un fulgor que se



Fig. 136.

llama *luz fría,* porque no es debida a una acción calorífica (elevación de la temperatura del gas) sino a una acción puramente electrónica. Este fenómeno ha recibido el nombre de *luminiscencia.*

El color obtenido es distinto según la naturaleza del gas contenido en el tubo. Pero el ojo humano no es igualmente sensible a todas las radiaciones y su máximo de sensibilidad corresponde al amarillo anaranjado; por tanto, si no hay que tener en cuenta otra consideración que la del rendimiento, se escogerá un gas que dé una luz amarilloanaranjada.

Los tubos luminosos son empleados sobre todo para fines de publicidad, en los que es necesario obtener un efecto decorativo mediante diversos colores y, por tanto, la cuestión del rendimiento pasa a segundo término.

Los tubos más extendidos son los de neón, los cuales dan una luz rojoanaranjada. Otros tubos contienen vapor de mercurio, gas carbónico, hidrógeno, etc., y directamente o empleando vidrio fluorescente producen una luz azul, verde, rosa, blanca o amarilla.

Los tubos empleados para el alumbrado de publicidad tienen, en general, una gran longitud y un diámetro bastante pequeño; han de ser alimentados con corriente alterna de tensión bastante elevada: un tubo de 6 metros de largo necesita una tensión de unos 800 volts. Para las instalaciones alimentadas por un sector de 110 volts es preciso emplear un transformador elevador de la tensión.

El consumo específico es, para el neón, de unos 0,7 watts por bujía, sin contar la potencia perdida por la transformación. Este sería el consumo en el caso de que el sector proporcionase la energía en alta tensión; teniendo en cuenta la pérdida en el transformador, puede evaluarse el rendimiento en 0,9 watts por bujía.

Los tubos de vapor de mercurio se emplean sobre todo para alumbrar los talleres fotográficos, porque dan una luz muy actínica; también emiten rayos ultraviolados que se utilizan en terapéutica y por sus propiedades esterilizantes. Para este fin la lámpara debe estar construída con cuarzo transparente o con un vidrio especial, pues el vidrio ordinario absorbe la mayor parte de los rayos ultraviolados. Hay que tener cuidado de no mirar nunca una lámpara de cuarzo en funcionamiento sin protegerse la vista con gafas de vidrio especial, porque los rayos ultraviolados pueden producir graves accidentes en la conjuntiva.

El tipo más extendido de lámpara de vapor de mer-

curio es la lámpara Cooper-Hewitt, la cual puede funcionar a 110 volts, a condición de que haya sido previamente cebada.

En marcha normal, esta lámpara está ligeramente inclinada con relación a la horizontal; el tubo lleva en su parte superior un ensanchamiento en el que está alojado un electrodo de hierro puro de forma de copela; la parte inferior está constituída por una protuberancia que contiene el mercurio y que además actúa como cámara de condensación con objeto de evitar que la temperatura del vapor de mercurio se eleve por encima de un valor determinado (140° aproximadamente). El inconveniente de esta lámpara es que no puede cebarse sola; en efecto, en frío la presión del vapor de mercurio es extraordinariamente débil y para dejar pasar la corriente sería necesaria una tensión muy grande. Para cebarla se bascula el tubo con objeto de ponerlo horizontal durante un momento. El soporte del tubo está provisto de un sistema de alzamiento mediante resorte, con el cual se logra reunir por un filete de mercurio ambos electrodos y que pase la corriente eléctrica; entonces se eleva la temperatura, sube la tensión del vapor de mercurio a 2 milímetros y la luminiscencia se mantiene a la tensión de 110 volts.

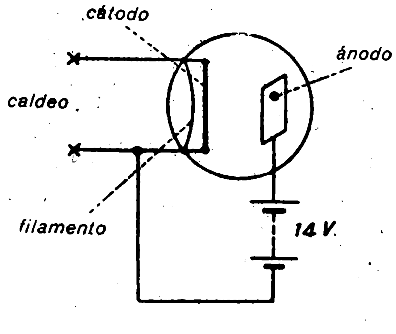


Fig. 137.

A veces se emplean también dispositivos de cebamiento automático mediante electroimanes. En todos los casos una resistencia limita la intensidad de la corriente durante el cebamiento.

La aplicación más reciente del alumbrado por luminiscencia es la *lámpara de vapor de sodio*.

Esta lámpara es un tubo luminiscente que funciona con una tensión muy débil, con lo cual se evita la desintegración de los electrodos al tiempo que se reduce la caída de tensión catódica y pueden emplearse corrientes de gran intensidad.

La tensión aplicada (12 a 14 volts en las lámparas Philora de la sociedad Philips) no permitiría, sin recurrir a un artificio especial, el paso de la corriente. Por esto en la bombilla se ha dispuesto un cátodo caldeado mediante un filamento; este cátodo produce en el tubo un flujo de electrones que vuelven conductor al espacio comprendido entre los electrodos y permite el paso de la corriente. El principio de la lámpara de vapor de sodio es, pues, análogo al de una lámpara de T. S. H.

El tubo contiene indicios de neón y sodio metálico. En el neón se establece la descarga al encender la lámpara; entonces la luz emitida es roja, pero al cabo de algunos minutos el calor desarrollado por la descarga hace pasar gradualmente el sodio al estado de vapor, y la luz, al tiempo que adquiere mucha más intensidad, vira rápidamente al amarillo (raya espectral amarilla del sodio).

Para mantener vaporizado al sodio, las lámparas están aisladas mediante una campana de vidrio de dobles paredes que envuelve a la bombilla. En régimen normal la temperatura en el interior del tubo es de unos 300°.

Estas lámparas tienen un rendimiento excelente: el factor de eficacia (véase más adelante) alcanza a los 70 lumens por watt, o sea más del cuádruple del de una lámpara de incandescencia de atmósfera gaseosa.

Su inconveniente es que dan una luz amarilla monocromática que suprime las diferencias de color de los objetos.

Sin embargo, este hecho deja de ser un inconveniente cuando la lámpara se utiliza para el alumbrado de exteriores (carreteras, túneles, etc.); en este caso los detalles son más visibles, los contrastes aparecen más marcados, queda suprimido el deslumbramiento y la vista se fatiga menos, amén de que el rendimiento es excelente, ya que el amarillo corresponde al máximo de sensibilidad de la retina.

Las lámparas de vapor de sodio son de construcción distinta según que estén destinadas a funcionar con

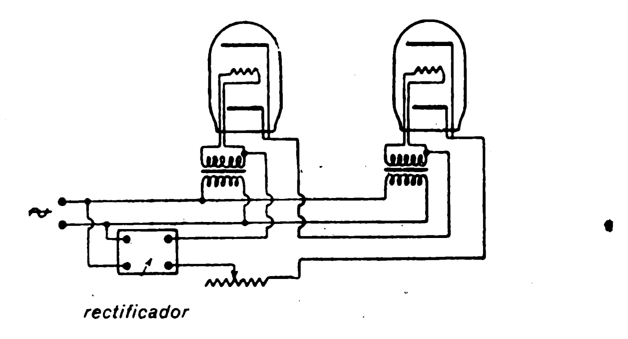


Fig. 138. — Montaje de lámparas de vapor de sodio sobre corriente alterna.

corriente alterna ordinaria o con corriente continua (o alterna rectificada).

En todos los casos el filamento es alimentado con corriente alterna de baja tensión; en general, el transformador está colocado sobre el pie soporte de la lámpara.

Las lámparas de corriente continua están constituídas por un tubo de vidrio en el interior del cual hay dos ánodos y un cátodo.

Los dos ánodos están reunidos en el exterior de la lámpara, y el cátodo, que emite electrones, está consti-

tuído por óxidos de tierras raras caldeadas mediante un filamento.

Cuando hay que alimentar varias lámparas se agrupan en serie.

Las lámparas destinadas a funcionar con corriente alterna están, en general, construídas para una tensión de 220 volts.

El tubo está doblado varias veces sobre sí mismo y lleva dos electrodos simétricos que alternativamente hacen de ánodo y de cátodo. Un electrodo de excitación equidistante de los electrodos principales sirve para el cebamiento, el cual se efectúa entre uno cualquiera de los cátodos y el ánodo de excitación (fig. 139).

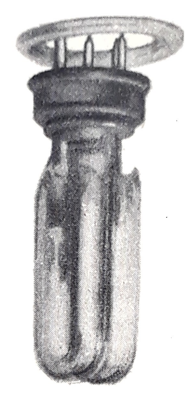


Fig. 139.
Lámpara de vapor de sodio.

3.° **Lámpara de incandescencia.** — Salvo los casos especiales que acabamos de indicar, los manantiales luminosos empleados exclusivamente para todas las aplicaciones del alumbrado son las lámparas de incandescencia de filamento metálico, pues su montaje extraordinariamente sencillo, su fácil adaptabilidad a todos los usos, su seguridad, su baratura y su buen rendimiento, las hacen preferibles a todos los demás sistemas de alumbrado.

Las primeras lámparas estaban constituídas por un filamento de carbón dispuesto dentro de una bombilla vacía de aire para evitar su combustión. Después se han ensayado diversos metales: osmio, tántalo, etc. Actualmente se emplea el tungsteno, metal que tiene la gran ventaja de que se funde a una temperatura muy alta (3385°) y se convierte en vapor con extrema lentitud.

En efecto, el consumo específico de una lámpara es tanto más débil cuanto más alta es la temperatura del filamento. Por tanto, hay interés en aumentar lo más posible esta temperatura; en este respecto no es una limitación el temor de que pueda alcanzarse la temperatura de fusión del metal, sino más bien los inconvenientes debidos a la vaporización del filamento. Las moléculas de este último adquieren, en efecto, movimientos extraordinariamente rápidos bajo la influencia de la alta temperatura a la cual se ha calentado y en su virtud se produce una desagregación que es favorecida por la falta de presión en la atmósfera de la bombilla. Esta volatilización tiene por efecto reducir el diámetro del filamento y, por tanto, su duración, y además recubrir el interior de la bombilla con una capa oscura que absorbe la luz.

Estos inconvenientes se evitan llenando la bombilla con un gas de gran peso atómico (nitrógeno y mejor todavía argón) y dando al filamento una forma tal que la cantidad de calor cedida al gas sea muy pequeña. Se llega de esta manera a hacer funcionar el filamento a una temperatura de 2460 a 2700°, según la potencia de las lámparas, al tiempo que se les asegura una duración de 800 a 1000 horas. Por otra parte, la luz obtenida en estas condiciones se aproxima más a la luz solar.

OBSERVACIONES ACERCA DE LA EFICACIA LUMINOSA DE LAS LÁMPARAS DE INCANDESCENCIA. — Se llama *eficacia luminosa* de una lámpara a la relación entre el flujo luminoso total que produce y la potencia eléctrica que consume. Esta eficacia se expresa en lumens por vatt.

La eficacia luminosa de las lámparas de incandescencia aumenta con su potencia y, por tanto, hay interés, siempre que ello sea compatible con la uniformidad del alumbrado, en emplear un número restringido de

lámparas de gran potencia, mejor que un gran número de lámparas de pequeña potencia.

La eficacia luminosa, así como la duración, son tanto más grandes cuanto más baja es la tensión de utilización.

En efecto, cuanto más alta es la tensión más resistente debe ser el filamento y, por consiguiente, tanto más largo y fino, resultando que las lámparas para tensiones altas son más caras, más frágiles y tienen menos rendimiento que las lámparas para bajas tensiones (una lámpara de 75 watts que funcione a 25 volts suministra 35 °/$_0$ más de flujo luminoso y dura cuatro veces más que la misma lámpara funcionando a 110 volts). Pero las empresas de distribución tienen interés, por el contrario, en distribuir la energía a una tensión relativamente alta y, en general, han adoptado la tensión de 110 volts y a veces la de 220 volts.

Se ha ideado emplear lámparas de baja tensión agrupándolas en serie, por ejemplo 4 lámparas de 28 volts en un sector de 110 volts (Metro de París: 5 lámparas de 110 volts bajo 550 volts); pero esta disposición tiene como principal inconveniente el que cuando se rompe una lámpara se apaga toda la serie.

Por consiguiente, si se dispone de corriente alterna es preferible emplear un transformador que disminuya la tensión. Observemos que en este caso será necesario: 1.°, resignarse a sufrir una pérdida en el transformador; 2.°, aumentar la sección de los conductores, porque a igualdad de potencia la intensidad es mayor, lo cual es causa de complicaciones, gastos suplementarios y dificultad en el aprovisionamiento de las lámparas.

Sin embargo, podrá emplearse el sistema de bajo voltaje en todos los casos en que:

1.° haya peligro de electrocución (aparatos portátiles, obreros que trabajan en las calderas), pues las

tensiones del orden de 30 volts son completamente inofensivas;

2.° el aislamiento sea difícil: instalaciones al aire libre, señales en las vías férreas;

3.° haya que temer el peligro de incendio: depósitos de materias inflamables, buques, etc.

A menudo es ventajoso aumentar la eficacia de las lámparas en detrimento de su duración; en este caso se



Fig. 140. — Lámpara «flecha» de neón.

Fig. 141. — Lámparas Philinea.

tiene el mismo flujo luminoso con menos corriente, pero es necesario cambiar las lámparas más a menudo. Si la energía eléctrica es cara y las lámparas son baratas, la economía realizada en corriente compensará los gastos de recambio de lámparas. También puede ocurrir lo contrario, o sea hacer funcionar las lámparas a tensión reducida con objeto de hacerlas durar más tiempo, para lo cual hay que gastar más corriente para obtener el mismo flujo luminoso. Esta es, pues, una cuestión de lugar y hay fórmulas empíricas que permiten calcular la duración más económica en función del precio de la corriente y de las lámparas.

No obstante, sólo puede ser ventajoso aumentar la

tensión con la condición de que la tensión de utilización permanezca completamente constante, cosa que no sucede en la mayor parte de sectores, resultando que las variaciones de tensión y los encendidos y las extinciones repetidas acortan mucho la duración de las lámparas.

Designación de las lámparas.—Las lámparas eléctricas han sido designadas durante mucho tiempo por su intensidad luminosa media en dirección horizontal, expresada en bujías. Como que los filamentos de todas

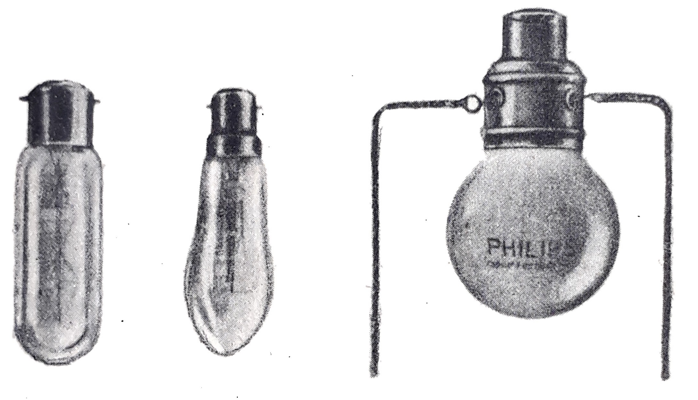


Fig. 142.—Lámparas en forma de llama y de tubo.

Fig. 143. — Lámpara de dos intensidades.

las lámparas tenían casi la misma forma y generalmente ocupaban la misma posición, esta designación permitía la comparación. Pero a partir del momento en que se fabricaron lámparas provistas de filamentos de formas distintas, la consideración de la intensidad luminosa en dirección horizontal ya no ha sido suficiente para caracterizar una lámpara y permitir compararla con otra. Por este motivo se ha tomado como punto de comparación el flujo luminoso total emitido por la lámpara expresado en lumens. Sin embargo, se ha considerado más cómodo para la práctica corriente designar

las lámparas por la potencia eléctrica que consumen.

La tabla siguiente indica, para las potencias estandardizadas, el flujo luminoso producido por las lámparas de 110 volts.

POTENCIA WATTS	FLUJO LUMINOSO PRODUCIDO LUMENS	EFICACIA LUMINOSA LUMENS/WATT
25	250	10
40	440	11
60	750	12,5
75	1000	13,3
100	1400	14
150	2225	14,8
200	3160	15,8
300	5100	17
500	9000	18
750	14250	19
1000	19500	19,5
1500	30000	20
2000	40000	20
3000	60000	20

Además de las lámparas de vidrio claro, también se fabrican lámparas de vidrio opalino, con objeto de disminuir el brillo. Asimismo se hacen lámparas semideslustradas en las que sólo la mitad opuesta a la armadura está deslustrada, y la otra mitad es de vidrio transparente. Estas lámparas, empleadas en reflectores adecuados, evitan el deslumbramiento al tiempo que dan un buen rendimiento.

A menudo para el alumbrado de escaparates se emplean *lámparas-tubos,* las cuales tienen un filamento rectilíneo, con tope de contacto en cada extremidad.

Para la iluminación de tiendas de tejidos se emplean lámparas de *luz diurna,* cuya bombilla, de vidrio azu-

lado especial, tiene por finalidad absorber los rayos rojos en exceso; debido a la absorción producida por



Fig. 144 – Lámpara en forma de llama; vidrio abollado.



Fig. 115. Lámpara «iluminación».

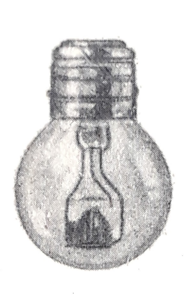


Fig. 146. Lámpara para coche, con filamento «code».



Fig. 147. Lámpara para proyecciones.

el vidrio azul, estas lámparas tienen una eficacia luminosa menor en un 30 a 40 °/₀ que la de las lámparas de vidrio incoloro.



Fig. 148. Lámpara para proyecciones.

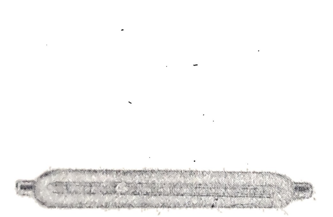


Fig. 149. Lámpara para escaparates.

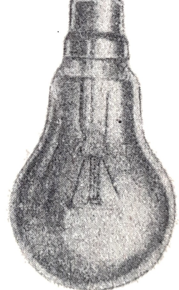


Fig. 150. Lámpara «luz diurna».

Por último, se ha estandardizado una serie de lámparas *deslustradas interiormente* que se designan con el nombre de *lámparas perla;* su rendimiento es mayor

que el de las lámparas opalinas y no retienen el polvo como las lámparas deslustradas exteriormente.

III. Establecimiento de un proyecto de alumbrado

1.° Datos fotométricos

Naturaleza de los focos luminosos. — Las condiciones que hay que realizar en una instalación de alumbrado son las siguientes:

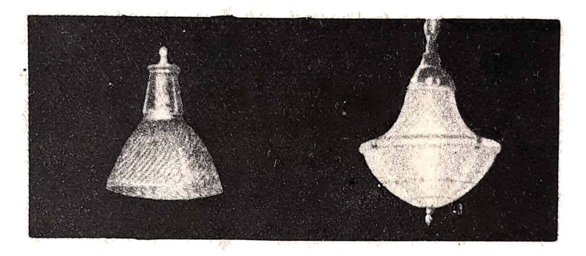


Fig. 151. — Luz directa. Fig. 152. — Luz semidirecta.

1.ª Evitar el deslumbramiento;

2.ª Obtener una repartición lo más uniforme posible de la iluminación;

3.ª Realizar una iluminación conveniente a cada clase de trabajo;

4.ª No despreciar el efecto decorativo;

5.ª Obtener un rendimiento aceptable.

Examinemos cuáles son los aparatos racionales indicados para llenar estas condiciones.

Estos aparatos pueden clasificarse en cinco grupos.

a) *Aparatos de iluminación directa*. Toda la luz es enviada hacia abajo, en dirección a los planos de utilización. Esta forma de iluminación es la más económica, pero es poco agradable y produce sombras duras. Es el tipo de alumbrado industrial (fábricas, almacenes, etc.).

b) *Aparatos de iluminación semidirecta*. La mayor parte del flujo luminoso es dirigido hacia abajo, pero una cierta parte de la luz va hacia el cielorraso, el cual la refleja difundiéndola.

Esta forma de iluminación produce sombras más suaves que la iluminación directa y no consume una cantidad demasiado grande de energía eléctrica.



Fig. 158. — Luz mixta.

c) *Aparatos de iluminación mixta*. Sensiblemente es enviada tanta luz hacia arriba como hacia abajo. Esta clase de aparatos comprende todos los difusores encerrados en vidrio opalino, cuya forma no difiere demasiado del globo esférico. El difusor en este caso no tiene por finalidad modificar la repartición de la luz en provecho de una dirección dada, sino disminuir el brillo aumentando la superficie luminosa. Se admite que para no fatigar la vista el brillo debe ser inferior a 0,5 stilbs. Esta condición conduce a adoptar para los globos difusores los siguientes diámetros:

POTENCIA DE LA LÁMPARA WATTS	DIÁMETRO DEL GLOBO QUE SE HA DE ADOPTAR CENTÍMETROS
75	25
100	30
150	35
200	40
300	50
500	70

d) *Aparatos de iluminación semiindirecta.* La mayor parte del flujo luminoso es dirigido hacia el cielorraso, el cual lo refleja difundiéndolo, pero parte de la luz va hacia abajo. Un modelo extendido de iluminación semiindirecta es la tulipa de vidrio opalino; tiene el inconveniente de que el polvo se acumula sobre la tulipa y disminuye rápidamente el poder reflector; por este motivo se utilizan actualmente aparatos cerrados, los cuales suelen ser de una pieza y

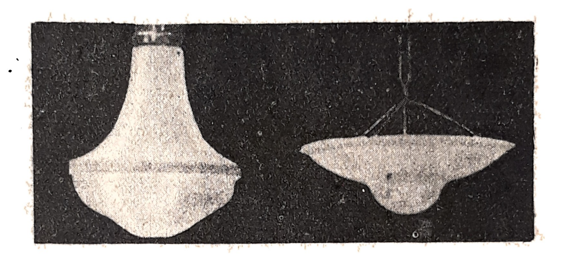


Fig. 154.
Luz semiindirecta.

Fig. 155.
Luz indirecta.

tienen la parte inferior de vidrio densamente opalinizado, mientras que la parte superior es de vidrio claro o satinado.

Esta forma de iluminación hace destacar suficientemente los relieves, cosa que no sucede con la iluminación totalmente indirecta, y a pesar de ello las sombras son muy suaves. Es más costosa que las formas de iluminación precedentemente expuestas, pero es recomendable para las viviendas, los almacenes, las escuelas, los cafés, etc.

e) *Aparatos de iluminación indirecta.* La totalidad de la luz es enviada hacia el cielorraso. Esta forma de iluminación es la mejor para evitar el deslum-

bramiento, pero es la más onerosa de todas y exige que el cielorraso sea muy claro y absolutamente mate. Con la misma pueden obtenerse efectos decorativos muy artísticos y se empleará con éxito en las instalaciones de lujo. También puede utilizarse en las aulas de dibujo, en los salones de lectura, en las oficinas y en todos los casos en que haya que suprimir las sombras.

Puede obtenerse una iluminación indirecta, ya sea utilizando una tulipa opaca, ya también disponiendo reflectores en recipientes, en nichos abiertos en los muros y cerrados con paneles de vidrio deslustrado, en cuyo caso se emplean reflectores disimétricos.

También pueden utilizarse proyectores especiales colocados en lo alto de los muros en las esquinas del local y que iluminan el cielorraso con rayos rasantes.

Por último, cuando sea posible, pueden practicarse en el cielorraso molduras reflectoras en las que se colocan las lámparas, las cuales quedan así invisibles directamente e iluminan grandes extensiones del cielorraso, generalmente de forma de cúpula. Este último sistema tiene el inconveniente de que necesita un gran número de lámparas de potencia relativamente pequeña y, por tanto, los gastos de establecimiento son elevados y se consume una cantidad importante de energía eléctrica.

Intensidad de los focos luminosos. — La iluminación que haya de realizarse en un local depende de la clase de trabajo que tenga que efectuarse en el mismo.

La potencia eléctrica necesaria para realizar una iluminación dada depende de las dimensiones del local y del poder reflector de las paredes y del cielorraso,

pero también depende de la clase de aparato usado (directo o indirecto).

En la tabla siguiente se encontrarán las iluminaciones preconizadas para los distintos locales.

LOCAL	ILUMINACIÓN LUX
Salones, comedores, dormitorios	30
Despachos	50
Lavabos, cuartos de baño	40
Vestíbulos	20
Cuartos de plancha	80
Cocinas	60
Aulas	80
Salas de lectura	80
Halls de hotel	40
Comedores de hotel	60
Oficinas comerciales	60
Bazares, salones de peluquería, salones de té	80
Garajes	50
Escenarios de cine. Mesas de operaciones.	2000

El establecimiento completo de un proyecto de alumbrado se saldría del marco de esta obra. No obstante, en la tabla siguiente se encontrarán los valores *aproximados* de la potencia consumida *por metro cuadrado* en las distintas condiciones. Esta tabla ha sido calculada para una iluminación media de 30 lux; si se adoptan iluminaciones de 50,... 80 lux, se multiplica el valor encontrado por las relaciones $\frac{50}{30}$, $\frac{80}{30}$, etc.

POTENCIA ELÉCTRICA NECESARIA (EN WATTS POR METRO CUADRADO) PARA OBTENER UNA ILUMINACIÓN DE 30 LUX

CIELORRASO... PAREDES	CLARO CLARAS				CLARO OSCURAS				OSCURO OSCURAS			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Piezas <25 m²	7,5	9	12	15	9	12	15	16,5	9	15	»	»
Piezas >25 m²	6	7,5	9	10,5	7,5	9	10,5	12	7,5	10,5	»	»

A..... iluminación directa B..... semidirecta
C..... semiindirecta D..... indirecta

La potencia total se obtiene multiplicando el valor encontrado en la tabla por la superficie de la pieza evaluada en metros cuadrados.

2.° Datos eléctricos

Número de circuitos independientes. — *Colocación de los cortacircuitos.* — Si la instalación es de poca importancia, hasta cinco o seis lámparas, basta una

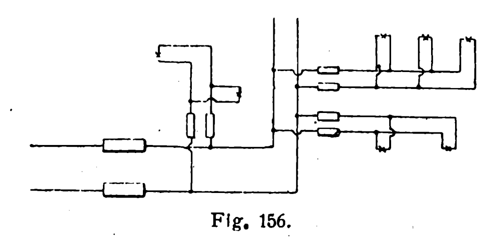
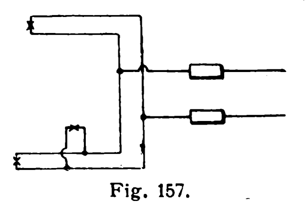


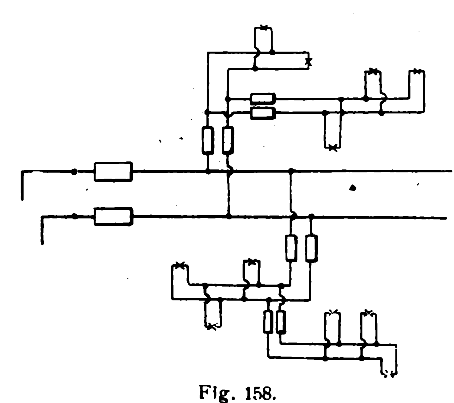
Fig. 156.

sola derivación sobre la cual se derivan los conductores que alimentan las lámparas, y en los puntos de derivación se colocan cortacircuitos o fusibles (figura 156). Sin embargo, si la instalación sólo com-

prende un pequeño número de lámparas, se pueden colocar los fusibles únicamente en los puntos de arranque de la derivación general (figura 157).


Fig. 157.

Si el número de lámparas es considerable, es posible derivar sucesivamente una serie de conductores, unos de otros, protegiendo estos diferentes circuitos con fusibles (fig. 158). Los inconvenientes de este procedimiento consisten: en el aumento de empalmes, es decir, de los puntos peligrosos desde el punto de vista del aislamiento general de la instalación; en que se hacen depender unos de otros todos los circuitos; en la distribución de los cortacircuitos, que a veces hay que colocarlos en puntos difíciles de alcanzar, y por último en que se necesitan muchos conductores de secciones diferentes. Por estas razones es preferible renunciar a la ventaja que tiene este método de reducir a un mínimo la longitud de los conductores en conjunto, dividiéndose en cambio los circuitos en varias derivaciones que parten del mismo origen, que es el contador.


Fig. 158.

Los distintos focos luminosos se agrupan según sus posiciones relativas, de manera que en cada circuito haya de seis a diez lámparas y circule una corriente de unos 5 amperes.

Si hubiera que derivar varios circuitos de una misma de estas derivaciones, es conveniente derivarlos a partir de un mismo punto.

En estas condiciones, pueden reunirse en un mismo sitio, fácilmente accesible, todos los fusibles que protegen un grupo de lámparas (fig. 159).

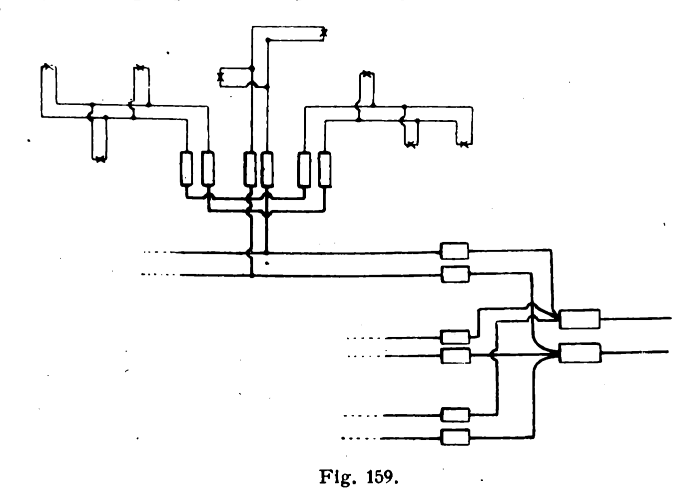


Fig. 159.

Los cortacircuitos deben colocarse sobre los dos hilos del circuito que protegen y todo lo más cerca posible de los conductores de que se derivan estos hilos.

En realidad podrían disponerse los cortacircuitos en uno solo de estos dos hilos, pero entonces todos los fusibles de la instalación deben estar sobre el hilo de igual polaridad. En efecto, supongamos, por ejemplo, que sobre un circuito (1) esté el fusible en el hilo + y que sobre otro circuito (2) esté en el hilo — (fig. 160); si se produce una tierra en el negativo del primer circuito, en *A*, y otra en el positivo de (2), en *B*, se ve que pasará una corriente que puede ser muy intensa, por el positivo de (2), por la tierra y por el negativo

de (1). Esta corriente no atravesaría ningún fusible, es decir, que los conductores no estarían protegidos. En cambio, si el cortacircuito de (2) estuviera sobre el hilo positivo, pasaría esta corriente por un fusible que protegería los conductores.

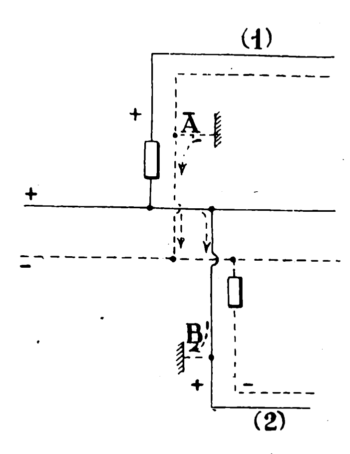


Fig. 160.

En el caso de una instalación hecha sobre los dos puentes de una instalación de tres hilos, es preciso adoptar precauciones especiales para el fusible que está en el hilo neutro; su sección debe ser mayor que la de los fusibles de los hilos extremos, y deberá estar convenientemente apretado por

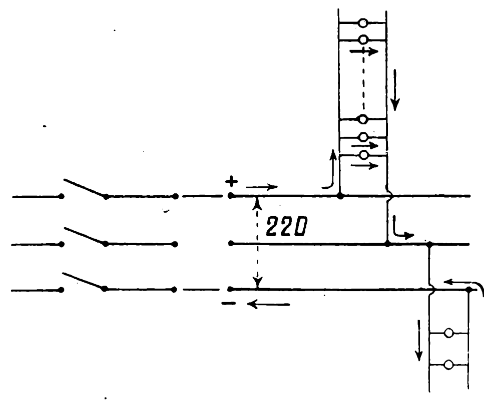


Fig. 161.

los tornillos de fijación, sin aplastarse y con contactos bien establecidos, para que no se produzcan en los

puntos de unión cortocircuitos que puedan provocar una ruptura o una fusión demasiado rápida.

Supongamos, en efecto, que sobre uno de los puentes haya diez lámparas, y sobre el otro solamente dos (figura 161); estos dos grupos de lámparas están sometidos al voltaje normal de 110 volts, por ejemplo. Ahora bien, si el fusible del hilo neutro se fundiera antes que uno de los otros dos, estos dos grupos de lámparas estarían en serie bajo un voltaje doble del de cada uno de los dos puentes, o sea bajo 220 volts, y la corriente sería la misma en estos dos grupos de lámparas, I amperes por ejemplo. Sea R la resistencia de cada lámpara; la resistencia del grupo que está sobre el primer puente es $\frac{R}{10}$ y la tensión en sus bornes es $U = \frac{R}{10} I$; la resistencia de las lámparas sobre el segundo puente es $\frac{R}{2}$ y la tensión $U' = \frac{R}{2} I$.

Se tiene por consiguiente $U' = 5\ U$. Como estos dos grupos están en serie bajo 220 volts, se tendrá:

$$U + U' = 220,$$

o sea:

$$U + 5\ U = 220, \qquad U = \frac{220}{6} = 36 \text{ volts} \qquad \text{y} \qquad U' = 184 \text{ volts.}$$

Las dos lámparas del segundo puente están sometidas a un exceso de voltaje de $184 - 110 = 74$ volts, y se fundirán.

Este mismo inconveniente se produciría si se dispusiera a la entrada de la instalación un interruptor tripolar en que las láminas correspondientes a los hilos extremos quedaran sobre sus contactos al abrir, o volvieran al cerrar, estando cortado el hilo neutro. Es necesario, por consiguiente, examinar con detenimiento este

interruptor y comprobar que no puede producirse semejante defecto.

La colocación de los circuitos debe hacerse de manera que sean fácilmente accesibles y que no desluzcan el decorado de las habitaciones. Se colocan, siempre que sea posible, en los corredores, cuartos pequeños, etc.

Los interruptores y conmutadores se deben colocar en puntos en que puedan utilizarse cómodamente y de tal manera que queden disimulados y resguardados

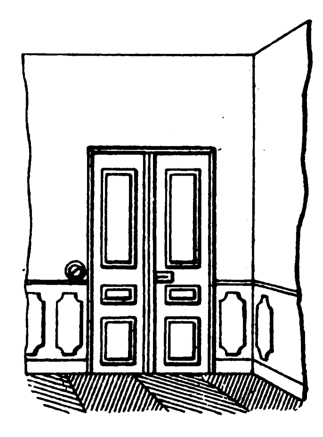


Fig. 162.

contra los golpes; por ejemplo, un interruptor para encender y apagar la luz de una habitación se coloca en el ángulo que forman la moldura superior del zócalo y la del jambaje de la puerta (fig. 162).

Cálculo de la sección de los conductores. — La sección de los conductores de los diferentes circuitos debe tomarse de tal modo, que estos conductores cumplan las condiciones siguientes:

1.ª *Tener una resistencia mecánica suficiente.* — Bastará para ello que el diámetro no sea menor de nueve décimas de milímetro.

Los conductores tendidos sobre aisladores de campana deben tener por lo menos 2 milímetros cuadrados de sección.

2.ª *No calentarse demasiado al paso de la corriente.* — Esta condición se satisface si las densidades de corriente admitidas en los conductores de cobre no son superiores a los valores dados en la tabla siguiente:

HILOS

SECCIÓN en milímetros cuadrados	DIÁMETRO en milímetros	RESISTENCIA KILOMÉTRICA en ohms, a 15° C.	DENSIDAD en amperes por milímetro cuadrado
0,50	0,8	34,00	10
0,63	0,9	26,98	10
0,78	1,0	21,79	10
0,95	1,1	17,89	10
1,13	1,2	15,04	9
1,53	1,4	11,11	9
1,76	1,5	9,65	8
2,01	1,6	8,45	8
2,54	1,8	6,69	8
3,14	2,0	5,41	6
3,80	2,2	4,47	6
4,91	2,5	3,46	6
5,72	2,7	2,97	6
7,07	3,0	2,40	4
9,08	3,4	1,87	4
12,56	4,0	1,353	4
15,90	4,5	1,069	4
19,63	5,0	0,916	4
23,75	5,5	0,715	4
28,27	6,0	0,601	4

CABLES

SECCIÓN en milímetros cuadrados	NÚMERO DE HILOS	DIÁMETRO DE CADA HILO en milímetros	RESISTENCIA KILOMÉTRICA en ohms, a 15° C.	DENSIDAD en amperes por milímetro cuadrado
2,69	7	0,7	6,31	8
3,51	7	0,8	4,84	6
4,45	7	0,9	3,82	6
5,49	7	1,0	3,09	6
7,14	7	1,14	2,38	4
7,91	7	1,2	2,14	4
9,28	7	1,3	1,83	4
10,77	7	1,4	1,57	4
12,36	7	1,5	1,37	4
14,07	7	1,6	1,20	4
15,89	7	1,7	1,06	4
17,78	7	1,8	0,95	4
19,38	19	1,14	0,87	4
21,47	19	1,2	0,79	4
25,08	19	1,3	0,67	4
29,26	19	1,4	0,58	4
33,44	19	1,5	0,508	3
38 19	19	1,6	0,445	3
43,13	19	1,7	0,394	3
48,26	19	1,8	0,352	3
56,98	37	1,4	0,298	3
65,12	37	1,5	0,261	3
74,37	37	1,6	0,228	2,8
93,98	37	1,8	0,180	2,6
116,18	37	2,0	0,146	2,3
140,64	37	2,2	0,120	2,2
181,62	37	2,5	0,093	2
261,54	37	3,0	0,064	1,8
299,38	61	2,5	0,056	1,7
402,91	61	2,9	0,042	1,6

Es prudente admitir como máximo de densidad de corriente los siguientes valores:

Densidad admisible de la corriente por mm²		
5	amperes.	hasta 5 mm²
4	»	de 6 a 15 mm²
3	»	» 16 a 50 »
2	»	» 51 a 100 »
1,5	»	» 101 a 200 »
1	»	» 200 mm² arriba.

3.ª *No producir entre el origen de la derivación y la lámpara más distante una caída de tensión superior a un valor determinado.* — Esta última condición conduce generalmente a la mayor sección de los conductores, y, por consiguiente, es la que determina la sección que hay que adoptar. Se comprueba después que se cumplen también las otras condiciones.

Para calcular las secciones necesarias para que se cumpla esta condición, se procede del modo siguiente.

Consideremos los dos conductores que parten del contador, sobre los cuales se hacen las derivaciones que alimentan directamente las lámparas de un circuito y admitamos que se da a los dos conductores principales la misma sección en toda su longitud.

Supongamos, por ejemplo, que los reglamentos impongan una caída de tensión máxima igual al 2 °/₀ de la tensión à la llegada del contador; se determinarán las secciones de los conductores de modo que la caída de tensión sea en ellos del tipo 1,5 °/₀, dejando para las derivaciones una caída posible del 0,5 °/₀.

En este caso se puede calcular la sección suponiendo que todas las derivaciones parten del punto medio de la longitud de los conductores. Sean: l esta longitud en metros, I_1, I_2, I_3 las intensidades de las corrientes en las distintas derivaciones, y 1,5 °/₀ la

caída de tensión admitida. Es decir, que hemos de

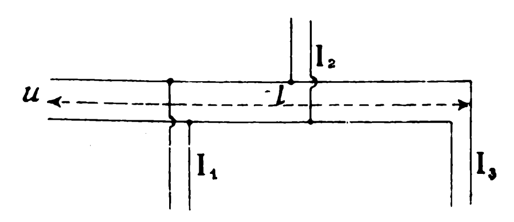


Fig. 163.

calcular la sección que deben tener dos conductores

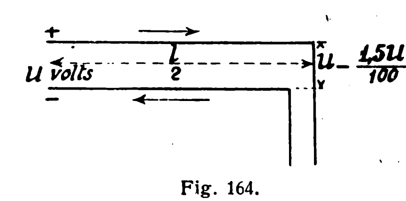


Fig. 164.

de longitud $\frac{l}{2}$ metros cada uno, recorridos por una corriente $I_1 + I_2 + I_3$ amperes, y tal que la caída de tensión sea igual al 1,5 % de la tensión aplicada (figs. 163 y 164).

Si s es, en milímetros cuadrados, la sección que buscamos, la resistencia de los dos conductores es:

$$r = \frac{1{,}8}{100} \times \frac{2\frac{l}{2}}{s} = \frac{1{,}8}{100} \cdot \frac{l}{s} \text{ ohms.}$$

La caída de tensión tiene por valor:

$$\frac{1{,}8}{100} \times \frac{l}{s} (I_1 + I_2 + I_3) \text{ volts,}$$

de manera que si U es la diferencia de potencial a la salida del contador, se debe tener:

$$\frac{1{,}8}{100} \times \frac{l}{s} (I_1 + I_2 + I_3) = 1{,}5 \frac{U}{100},$$

o sea:

$$1{,}8\, l\, (I_1 + I_2 + I_3) = 1{,}5\, U \cdot s,$$

de donde:

$$s = \frac{1,8\, l\,(I_1 + I_2 + I_3)}{1,5\, U}.$$

El cálculo de los hilos derivados se hace, si es preciso, de la misma manera.

Si las distancias que separan las derivaciones son bastante grandes y las corrientes que las recorren son intensas, las secciones de las distintas partes de los conductores deben ser diferentes.

Se simplifica mucho el cálculo de estas secciones admitiendo que en toda la longitud de los cables hay la misma densidad de corriente.

Sean l_1, l_2, l_3, ... metros las distancias que separan las diferentes derivaciones; I_1, I_2, I_3 las corrientes en estas derivaciones, y d amperes por milímetro cuadrado la densidad admitida de corriente.

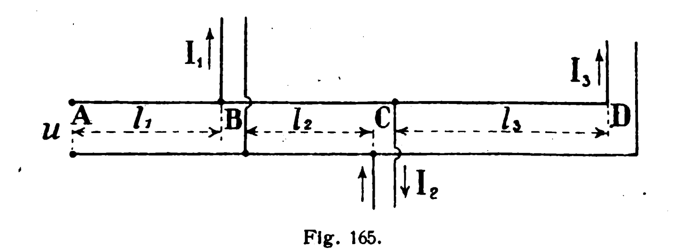


Fig. 165.

La corriente en la parte AB (fig. 165) es $I_1 + I_2 + I_3$ y la sección de los conductores será:

$$s_1 = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{d} \text{ milímetros cuadrados,}$$

y la resistencia:

$$r_1 = \frac{1,8}{100} \times \frac{2\, l_1}{\frac{I_1 + I_2 + I_3}{d}} = \frac{1.8}{100} \times \frac{2\, l_1 d}{I_1 + I_2 + I_3} \text{ ohms.}$$

La caída de tensión en esta parte es, por consiguiente:

$$\frac{1,8}{100} \times \frac{2\,l_1 d}{I_1 + I_2 + I_3} \times (I_1 + I_2 + I_3) = \frac{1,8}{100} \times 2\,l_1 d \text{ volts.}$$

De manera completamente análoga se ve que la caída de tensión entre *B* y *C* es:

$$\frac{1,8}{100} \times 2\,l_2 d,$$

y entre *C* y *D*:

$$\frac{1,8}{100} \times 2\,l_3 d.$$

Por consiguiente, la caída de tensión en toda la longitud de los conductores es:

$$\frac{1,8}{100} d\,(2\,l_1 + 2\,l_2 + 2\,l_3)$$

o sea:

$$\frac{1,8}{100} d \times 2\,l,$$

siendo l la distancia entre el origen de la instalación, es decir, el contador y la derivación más distante. Luego se debe tener:

$$\frac{1,8}{100} d \times 2\,l = \frac{1,5\,U}{100},$$

de donde:

$$d = \frac{1,5\,U}{3,6\,l} = \frac{1}{2,4}\,\frac{U}{l}.$$

Las secciones de las tres partes serán, expresadas en milímetros cuadrados, las siguientes:

$$s_1 = 2,4\,\frac{(I_1 + I_2 + I_3)\,l}{U}, \quad s_2 = \frac{2,4\,(I_2 + I_3)\,l}{U}, \quad s_3 = \frac{2,4\,I_3\,l}{U}.$$

EJEMPLO. — Sea una canalización principal *ABCD*, sobre la cual se toman tres derivaciones; la primera en *B*, a 15 metros del origen *A*, y que absorbe una

corriente de 10 amperes; la segunda en C, a 10 metros de A, y que absorbe 6 amperes; y la tercera en D, a

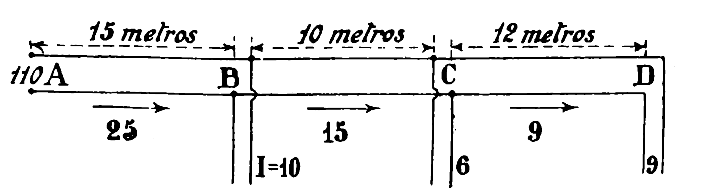


Fig. 166.

12 metros de C, y que absorbe 9 amperes. La tensión en A es de 110 volts y la pérdida de tensión en D debe ser de 1,5 °/₀ (fig. 166).

Densidad de corriente:

$$d = \frac{110}{2{,}4 \times 37} = 1{,}2 \text{ amperes por milímetro cuadrado,}$$

valor mucho menor que el de la tabla de la página 137.

Las secciones de las diferentes partes del conductor son, por consiguiente:

$$(AB) \quad s_1 = \frac{2{,}4 \times 37}{110} \times 25 = 0{,}8 \times 25 = 20 \text{ mm. cuadrados}$$

$$(BC) \quad s_2 = \frac{2{,}4 \times 37}{110} \times 15 = 0{,}8 \times 15 = 12 \quad » \quad »$$

$$(CD) \quad s_3 = \frac{2{,}4 \times 37}{110} \times 9 = 0{,}8 \times 9 = 7{,}2 \quad » \quad »$$

Emplearemos, por lo tanto, conductores de construcción ordinaria cuyas secciones se acerquen todo lo posible a los valores calculados, por ejemplo:

$d_1 = \frac{50}{10}$, que corresponde a una sección $s_1 = 19{,}63$;

$d_2 = \frac{40}{10}$, » » » » $s_2 = 12{,}56$;

$d_3 = \frac{30}{10}$, » » » » $s_3 = 7{,}07$.

Determinación de la sección de los conductores de una línea trifásica. — Sea una línea trifásica de 30 metros de longitud que alimenta con 110 volts un circuito de 90 lámparas de 25 bujías.

Las lámparas están igualmente repartidas entre las tres fases, es decir, que hay 30 lámparas por cada fase. Si el consumo específico es de 1,2 watts por bujía, la potencia absorbida por cada grupo es: $25 \times 1{,}2 \times 30 =$ $= 900$ watts.

La corriente en cada grupo es, por consiguiente:

$$I = \frac{900}{110} = 8{,}2 \text{ amperes}$$

y en cada línea será:

$$I' = 8{,}2\sqrt{3} = 8{,}2 \times 1{,}73 = 14{,}2 \text{ amperes.}$$

Admitiendo una densidad de 3 amperes por milímetro cuadrado, la sección de los conductores debe ser:

$$\frac{14{,}2}{3} = 4{,}73 \text{ milímetros cuadrados}$$

Luego se empleará un hilo de 25/10, cuya sección es 4,91 milímetros cuadrados.

Caída de tensión. — La resistencia por kilómetro del hilo 25/10 es de 3,46 ohms (tabla de la página 137), es decir, que la resistencia de cada línea es:

$$r = \frac{3{,}46 \times 30}{1000} = 0{,}1038 \text{ ohms.}$$

Según los cálculos hechos en el tomo I, referentes a las corrientes trifásicas (cap. XVI), se ve fácilmente que la caída de tensión es: $V = r\,I'\sqrt{3}$, o sea:

$$0{,}1038 \times 14{,}2 \times 1{,}73 = 2{,}56 \text{ volts.}$$

OBSERVACIÓN. — La caída de tensión es $r\,I'\sqrt{3}$;

ahora bien, $I' = I\sqrt{3}$, luego se tendrá para valor de la caída:

$$r \times I\sqrt{3} \times \sqrt{3} = 3\,r\,I,$$

es decir, igual a tres veces el producto de la resistencia de una línea por la corriente en cada fase.

Aislamiento de los conductores. — La «Union des Syndicats de l'Electricité» (libro 137, artículo 5) ha establecido las siguientes prescripciones:

«El aislamiento kilométrico, medido después de una inmersión, por espacio de 24 horas, de los conductores en agua a 15° y de dos minutos de electrificación mediante una batería de 300 volts, deberá alcanzar como mínimo los valores siguientes:

VALORES MÍNIMOS DEL AISLAMIENTO DE LOS CONDUCTORES AISLADOS CON CAUCHO

UTILIZACIÓN (1)	SECCIÓN CONDUCTORA inferior a 50 mm²	SECCIÓN CONDUCTORA comprendida entre 50 y 300 mm²	SECCIÓN CONDUCTORA comprendida entre 300 y 400 mm²	SECCIÓN CONDUCTORA superior a 400 mm²
	megohms	megohms	megohms	megohms
1.° Tensión de servicio máxima 250 volts	600	500	400	300
2.° Tensión de servicio comprendida entre 250 y 750 volts . . .	1200	1000	800	600
3.° Tensión de servicio superior a 750 volts . . .	2000	1750	1500	1200

Por lo que concierne a los conductores flexibles, el aislamiento kilométrico deberá ser de 500 megohms. Para las viviendas estará constituído por una o dos capas de caucho vulcanizado (grueso mínimo: 0,6 mm.) y la protección mecánica estará asegurada mediante un trenzado. Para los pequeños motores y las lámparas alimentadas hasta con 250 volts, el aislamiento estará asegurado con una o dos capas de caucho vulcanizado y la protección mecánica se realizará mediante una vaina de caucho vulcanizado que envuelva a los conductores y esté facultativamente completada por un trenzado.

Para los hilos y cables destinados a ser sometidos a una tensión inferior o a lo sumo igual a 750 volts, los gruesos de caucho tomados en la dirección del radio (protección mecánica excluída) serán como mínimo los siguientes:

SECCIÓN	TENSIÓN < 250 VOLTS	TENSIÓN > 250 VOLTS
mm²	mm.	mm.
0 a 9,5	1,0	1,2
10 » 20	1,1	1,3
21 » 60	1,3	1,6
65 » 84	1,5	1,8 a 2
94 » 105	1,9	2,2
116 » 128	2,0	2,5
141 » 167	2,3	2,7
182 » 212	2,5	3,0
228 » 262	2,8	3,3
299 » 376	3,0	3,5
399	3,3	3,8

Por último, cualquiera que sea la sección del conductor, la protección mecánica se obtendrá empleando una materia textil imputrescible, sea en forma de trenza embadurnada, sea en forma de cinta y de trenza emba-

durnada, sea incorporando esta materia imputrescible a una capa externa de caucho.

DIÁMETRO DE LOS FUSIBLES
(ALEACIÓN DE PLOMO, ESTAÑO Y COBRE)
QUE HAY QUE TOMAR PARA PROTEGER LAS INSTALACIONES
NO PROVISTAS DE FUSIBLES CALIBRADOS

CORRIENTE EN AMPERES	DIÁMETRO EN MILÍMETROS de los fusibles de protección	CORRIENTE EN AMPERES	DIÁMETRO EN MILÍMETROS de los fusibles de protección
0,25	20/100	8	14/10
0,50	25/100	9	15/10
1	35/100	10	16/10
1,50	45/100	12	18/10
2	6/10	14	20/10
2,50	8/10	16	22/10
3	9/10	18	24/10
4	10/10	20	27/10
5	11/10	25	30/10
6	12/10		

3.° Diversas combinaciones de alumbrado

1.° *Encender una sola lámpara de un grupo de dos o más lámparas.* — Esta disposición se emplea en el caso, muy raro por cierto, de que la energía se venda a un tanto alzado. El precio del abono está determinado por el número de lámparas que se usen; el dispositivo permite utilizar sucesivamente varias lámparas instaladas en habitaciones diferentes, no pagándose más que el abono de una sola. También se emplea en las habitaciones de los hoteles para que no se puedan tener encendidas dos lámparas al mismo tiempo.

El montaje se hace por medio de un botón conmutador *C* que tiene, además del contacto muerto, para apagar, un número de contactos igual al número de lámparas que se quieren utilizar separadamente (fig. 167).

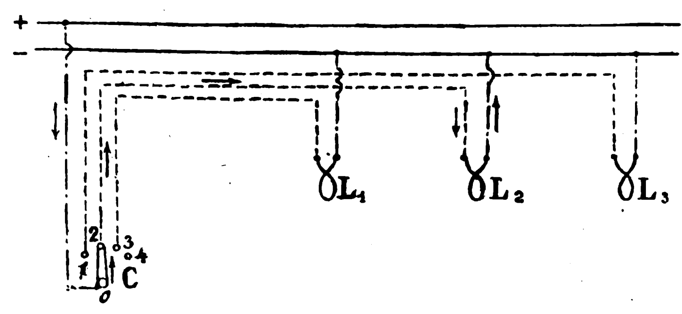


Fig. 167.

2.º *Encender y apagar una o varias lámparas desde dos puntos cualesquiera.* — Este montaje se conoce con el nombre de «vaivén». Se emplea con

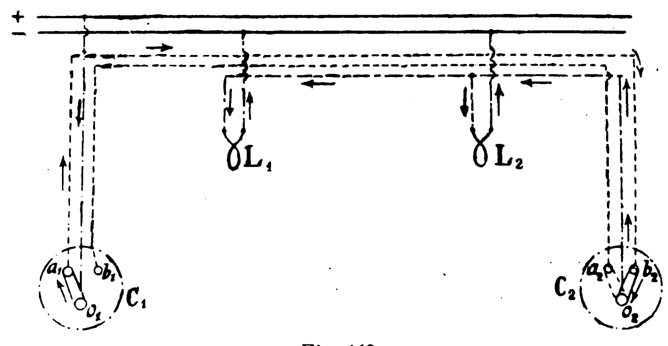


Fig. 168.

mucha frecuencia en los corredores, escaleras, habitaciones, etc., permitiendo encender desde un extremo del corredor, o abajo de la escalera, o al abrir la puerta, y apagar desde el otro extremo del corredor, o desde

arriba de la escalera, o desde otro punto de la habitación, desde la mesa o la cama, por ejemplo.

Esta combinación se consigue por medio de dos conmutadores de dos direcciones (fig. 168). Se ve que si la manivela del conmutador C_1 está sobre el contacto a_1 y la de C_2 sobre a_2, las luces están apagadas.

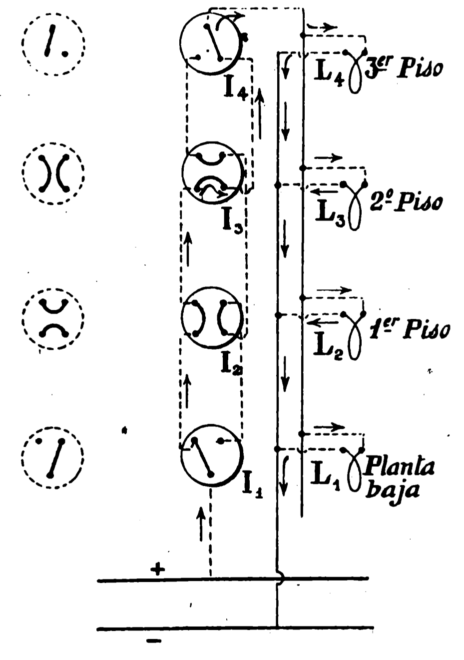


Fig. 169.

Si se coloca la manivela de C_2 sobre el contacto b_2, o la de C_1 sobre el b_1, se encienden las lámparas L_1 y L_2. Girando la manivela de uno cualquiera de los dos interruptores, se apagan otra vez las lámparas.

3.° *Encender y apagar un grupo de lámparas desde varios puntos.* — Este montaje se aplica sobre todo en el alumbrado de escaleras en las casas de

varios pisos, permitiendo encender las lámparas desde un piso cualquiera, y apagarlas después desde otro cualquiera. Se efectúa por medio de dos conmutadores ordinarios de dos direcciones dispuestos en la planta baja y en el piso superior, y por conmutadores especiales en los pisos intermedios.

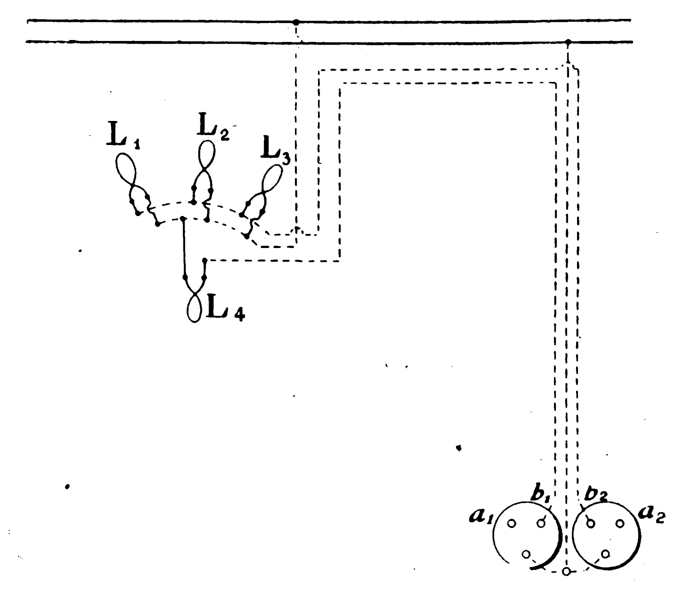


Fig. 170.

El montaje es el indicado en la figura 169. Se ve que estando los conmutadores en las posiciones I_1, I_2, I_3, I_4, que son las representadas en la figura, están encendidas las cuatro lámparas; se apagarán girando uno cualquiera de ellos, que tomará una de las posiciones representadas a la izquierda de la figura. Dando vuelta a uno cualquiera de los conmutadores, se encienden otra vez las lámparas.

4.° *Encender uno u otro de dos grupos de lámparas o ambos grupos a la vez.* — Este es el caso, por

ejemplo, de una araña con cuatro lámparas; se quiere encender una sola lámpara L_4 o tres lámparas L_1, L_2, L_3 o las cuatro lámparas a la vez. Se puede conseguir esta combinación por medio de dos conmutadores ordinarios de dos direcciones (fig. 170), o mediante un solo conmutador, como indica la figura 171.

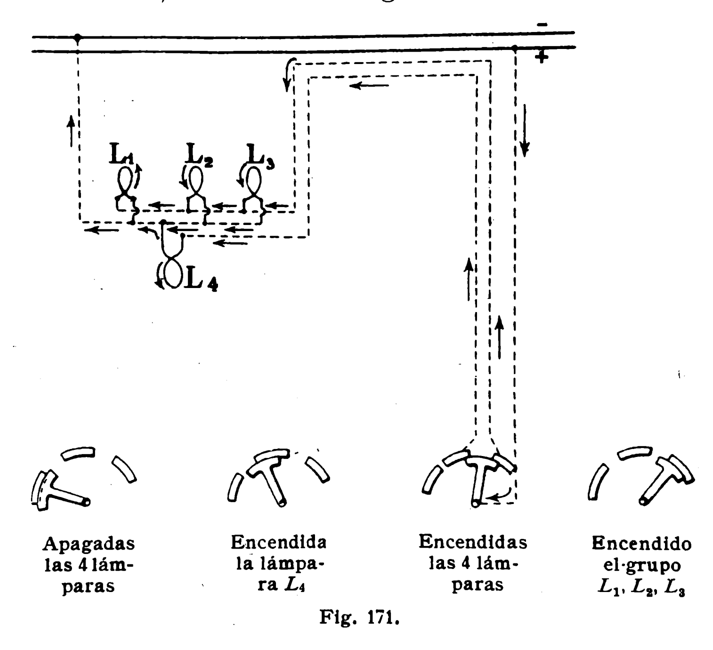


Fig. 171.

5.° *Montar dos lámparas que puedan funcionar en serie o en paralelo.* — Este montaje se aplica en el alumbrado de dormitorios, salas de hospitales, habitaciones, etc., y permite hacer funcionar las lámparas con su intensidad normal (agrupamiento en paralelo), o como mariposa, es decir, a media luz (agrupamiento en serie). El montaje está indicado en la figura 172.

6.° *Alumbrado a distancia por telerruptor.* — Cuando hay que encender y apagar a distancia varias

lámparas, resulta a veces económico no llevar los conductores de alimentación hasta los botones o conmuta-

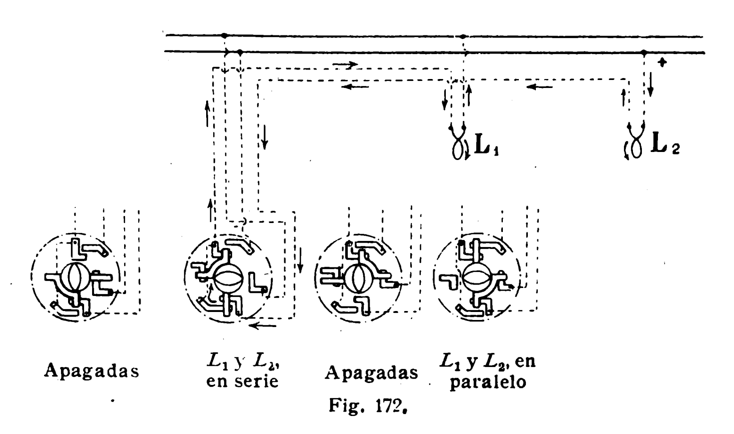


Fig. 172.

dores, empleándose con este objeto telerruptores, cuyos circuitos, recorridos por corrientes de poco voltaje producidas por pilas, pueden instalarse fácil y económicamente. La figura 173 representa el esquema de un montaje de esta clase.

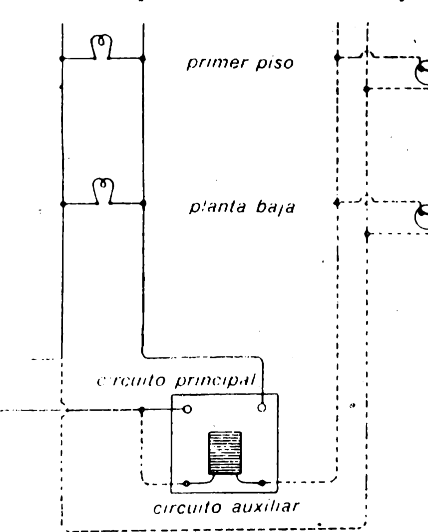


Fig. 173.

7.° *Alumbrado de una escalera por un interruptor con mecanismo de relojería.* — Para que las lámparas no queden encendidas por descuido durante mucho tiempo, se emplea un

interruptor de relojería que corta automáticamente la corriente después de un tiempo determinado (cuatro minutos, por ejemplo).

Al igual que un telerruptor, un aparato de relojería tiene un contacto principal y una bobina de núcleo móvil para engatillar dicho contacto. Pero el desengatillamiento sólo se produce al cabo de un tiempo dado, sin que sea necesario enviar de nuevo la corriente a

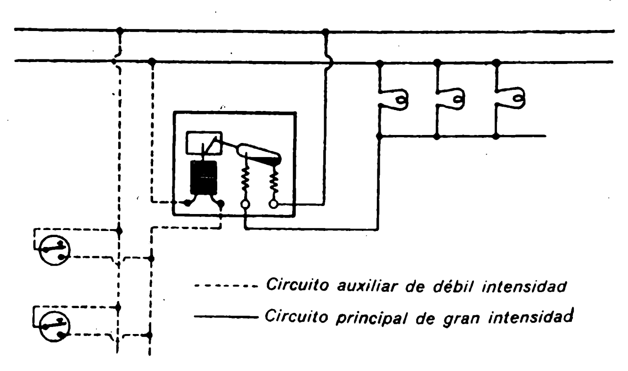


Fig. 174.

la bobina. El modelo representado aquí, construído por la «Société Als-Thom», se compone esencialmente:

1.° De un interruptor de escobillas mecánicas, *A*, que produce una doble ruptura en el circuito de alumbrado y que es gobernado por el aparato de relojería. Este interruptor está ideado de manera tal que se produzca un ligero rozamiento y una enérgica presión de las escobillas sobre los topes de contacto. La maniobra de este interruptor se efectúa por intermedio de la palanca *B* y es mantenido engatillado en la posición de cierre por la pequeña palanca *C*; basta hacer una ligera presión sobre el extremo de esta palanca para que se produzcan el desengatillamiento y la brusca ruptura del circuito;

2.° De un péndulo *D* que oscila libremente alrededor de una suspensión de lámina metálica flexible *E*;

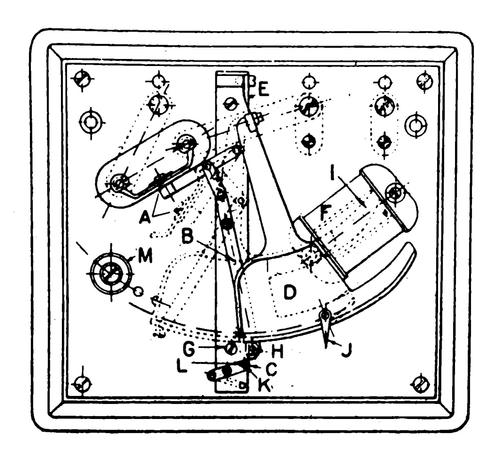


Fig. 175.

3.° De una bobina o solenoide *F* cuyo papel es producir por «absorción» el lanzamiento del péndulo al mismo tiempo que el cierre del interruptor por intermedio de pasadores *G* y *H*, que a la primera oscilación arrastran la palanca *B*.

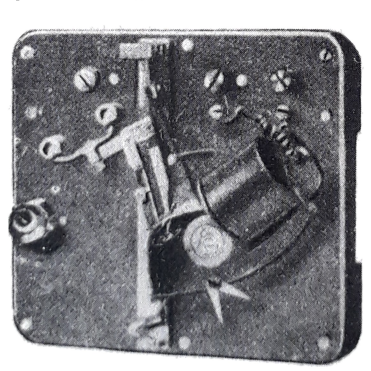


Fig. 176.

La masa pendular está constituída en parte por el núcleo *I* que penetra en el solenoide *F* al oscilar y en su parte inferior articula libremente un pequeño dedo *J* móvil en el plano de oscilación, y que se pone en contacto, cada vez que pasa a la posición de equilibrio, con una pieza

fija *K*, la cual tiene una muesca *L* y es solidaria de la palanca de desengatillamiento *C*. Cuando las oscilaciones disminuyen hasta una cierta amplitud mínima, el dedo no pasa más allá de la pieza *K* y a la oscilación siguiente se produce un apuntalamiento en la muesca *L* en virtud del cual se desplaza la palanca *C* y se desengatilla el interruptor.

La regulación del funcionamiento se hace para dos a cinco minutos desplazando el tope *M* que limita, desde la primera oscilación, la amplitud inicial; la medida del tiempo está basada únicamente en el amortiguamiento del movimiento del péndulo, y la precisión obtenida es del orden de $^1/_2$ segundo para una duración de funcionamiento de tres minutos.

CAPÍTULO VI

Montaje de la instalación

Colocación de los conductores

Es necesario tener en cuenta para colocar los conductores:

1.° Asegurar una protección mecánica suficiente de los conductores;

2.° Aislarlos convenientemente unos de otros y de la tierra;

3.° Que la instalación satisfaga las exigencias particulares de estética que requiere cada uno de los locales.

Es evidente que para esta última condición hay que someterse al precio fijado para el montaje de la instalación.

Los procedimientos empleados para colocar los conductores son:

a) sobre aisladores;
b) bajo molduras;

c) bajo tubos visibles;
d) bajo tubos empotrados en las paredes;
e) bajo plomo.

a) Montaje con hilos visibles sobre aisladores

Este procedimiento se emplea cuando no hay que preocuparse de la estética, sobre todo en los talleres, locales húmedos, sótanos, bodegas, subterráneos, etc.

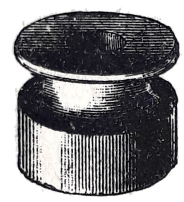


Fig. 177.

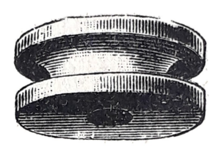


Fig. 178.

También se emplea algunas veces en las habitaciones, en el caso de *hilos flexibles*.

Los aisladores son poleas (figs. 177 y 178) o *bornes* (figura 179) de porcelana o de vidrio.

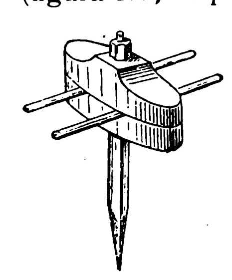


Fig. 179.

Se empieza por fijar los aisladores sobre las paredes según la dirección que hayan de seguir los conductores, colocados unos de otros a una distancia de 2,5 centímetros por lo menos, para una tensión de 110 volts, y de 5 centímetros para 220 volts. Las distancias entre los aisladores varían con la forma y los recodos del recorrido de las líneas; en las partes rectas se colocan de 0,80 a 1 m., en las curvas se ponen tanto más cerca cuanto más acentuada sea la curva.

Se fijan los aisladores en la pared por medio de tornillos en tacos de madera.

Cuando hay que colocar paralelamente varios conductores, se fijan las poleas sobre una armazón de hierro que se empotra en las paredes. A veces, los conductores deben pasar por debajo de los techos, colgados de viguetas de hierro; en este caso se fijan las poleas sobre estribos que se enganchan a las alas de las viguetas (fig. 180). Cuando los conductores han de pasar por una esquina, se utilizan poleas especiales (fig. 181).

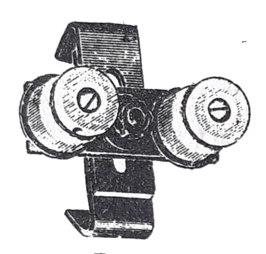


Fig. 180.

Una vez colocados todos los aisladores, se tienden los conductores. Si se emplean bornes, los conductores se disponen en las canaladuras convenientemente tirantes, y se aprieta fuertemente la cubierta por medio del tornillo de fijación. Para poder obtener una presión suficiente, sin perjudicar la vaina aisladora del conductor, es muy útil arrollar sobre el hilo, en la parte que debe entrar en las ranuras, una cinta de *chatterton*.

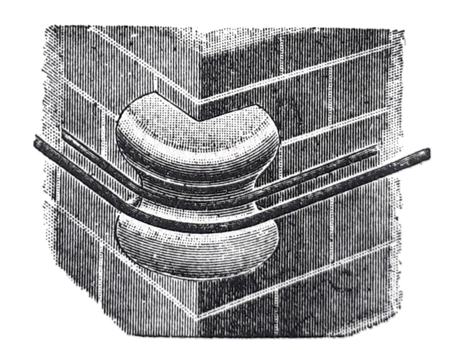


Fig 181.

Cuando se emplean poleas, se rodea la garganta de la polea con el hilo, si el diámetro de éste es menor de 3 milímetros; si el diámetro es mayor, se pone el conductor en la garganta, sin darle la vuelta, se coloca bien tirante y se amarra a la polea mediante

un hilo de cobre recocido aislado, de 1 a 2 milímetros de diámetro. Este hilo se pasa alrededor de la garganta de la polea y se arrollan sus extremos sobre el conductor, de modo que queden a un lado y a otro de la polea de seis a diez espiras.




Figs. 182 y 183.

Las derivaciones tomadas sobre estos conductores deben hacerse siempre cerca de un aislador; el hilo derivado ha de fijarse también sobre un aislador dispuesto todo lo cerca posible del punto de unión de los dos conductores. De este modo se evita todo esfuerzo de tracción sobre el empalme. La derivación puede hacerse por empalmes o por medio de enlaces como los representados en las figuras 182 y 183. Estos enlaces se aíslan como los empalmes o se encierran en cajas de porcelana (fig. 184).

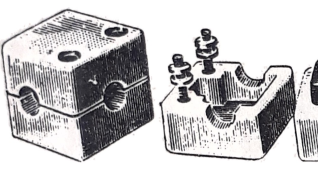


Fig. 184.

Instalación con hilos flexibles. — El montaje con hilos flexibles torcidos es poco recomendable. La protección mecánica no es muy buena; cuando se limpian los locales en que se encuentran, o se pintan o reparan las paredes, los conductores se aflojan, siendo imposible estirarlos otra vez convenientemente. Además, si las cubiertas aisladoras no son perfectas o son susceptibles de deteriorarse, el aislamiento de los hilos, que tienen entre sí un gran número de puntos de contacto, puede ser insuficiente.

Este procedimiento sólo debe tolerarse en ciertos sitios de la instalación, para conductores visibles en los techos, conductores de alimentación de lámparas, etc.

El aislamiento debe estar formado, por lo menos, por dos capas de caucho natural; no deben usarse hilos recubiertos de caucho vulcanizado, que se seca con el

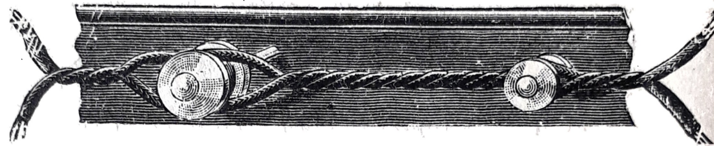


Fig. 185.

tiempo y acaba por desintegrarse ocasionando corto-circuitos.

Para fijar los hilos flexibles se emplean generalmente poleas pequeñas de hueso o porcelana; en los puntos de fijación se abre el torcido y se introduce la polea entre los dos hilos, que se vuelven a torcer de modo que queden apretados contra la garganta. Las poleas se clavan en el techo o en las paredes con puntas de cabeza redonda o con tornillos (fig. 185).



Fig. 186.

A veces se emplea el aislador telescópico de Peschel, formado por dos piezas, entre las cuales se aprietan los conductores, al mismo tiempo que se fija el aislador contra la pared, sea por medio de un tornillo que penetra en un taco de madera clavado de antemano en la pared o por medio de un clavo especial de vástago fileteado provisto de una tuerca (figura 186). Entre el aislador y la pared se interpone una pequeña rodaja que permite apretar fuertemente el aislador sin que salte la porcelana.

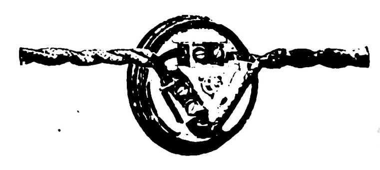


Fig. 187.

Los enlaces y derivaciones se hacen por medio de rosetas cuyas formas están indicadas en las figu-

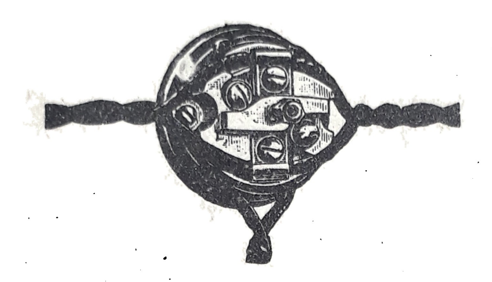


Fig. 188.

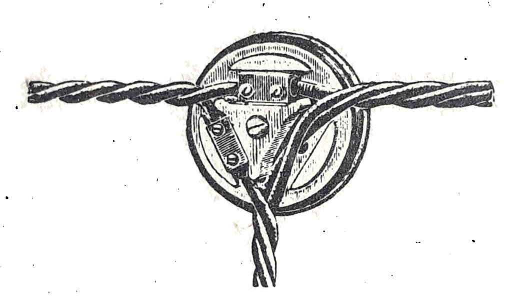


Fig. 189.

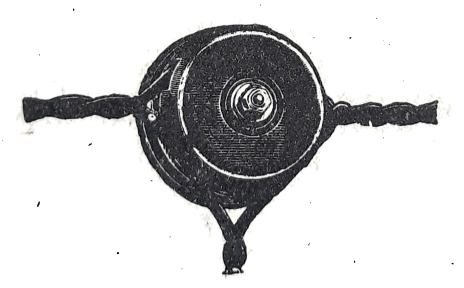


Fig. 190.

ras 187 a 191. Es preferible usar estas rosetas, cuyo

precio no es elevado, a unir los tubos por empalmes o bornes no aislados.

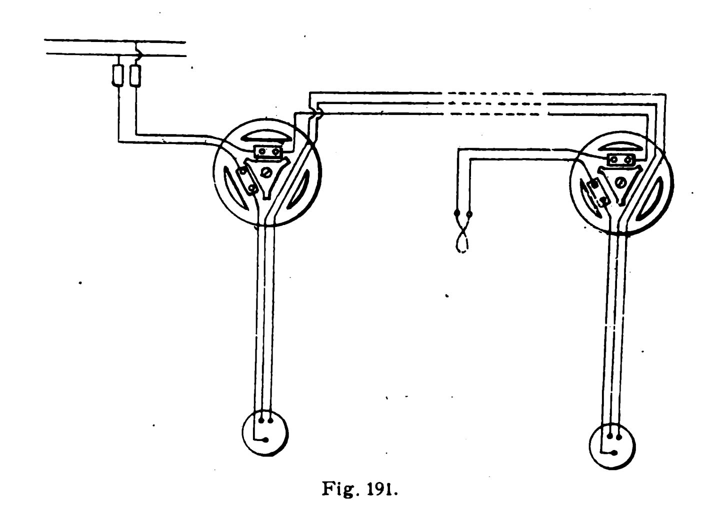


Fig. 191.

b) Montaje bajo molduras

Los conductores se colocan en las ranuras paralelas practicadas en listones o molduras generalmente de abeto, y a veces de haya. Estas molduras se tapan con una cubierta también de madera (fig. 192).

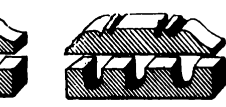


Fig. 192.

En el comercio se encuentran molduras con dos o más ranuras, de todos los diámetros corrientes. Los conductores han de entrar fácilmente en las ranuras, sin rozamiento fuerte. Las dimensiones de las molduras generalmente empleadas son las indicadas en la tabla siguiente:

HILOS			CONDUCTORES AISLADOS PARA 110 VOLTS. Aislamiento: 300 megohms		CONDUCTORES AISLADOS PARA 220 VOLTS. Aislamiento: 600 megohms	
Sección en mm. cuadrados	Núm. de hilos	Diámetro en mm.	Diámetro de los conductores aislados	Diámetro de las ranuras en mm.	Diámetro de los conductores aislados	Diámetro de las ranuras en mm.
0,50	1	8/10	3,5	4	4,2	5
0,63	1	9/10	3,6	»	4,3	»
0,78	1	10/10	3,7	»	4,4	»
0,95	1	11/10	3 8	»	4,5	»
1,13	1	12/10	3,9	5	4,6	»
1,54	1	14/10	4,1	»	4,8	»
1,77	1	15/10	4,2	»	4,9	6
2,01	1	16/10	4,3	»	5,0	»
2,54	1	18/10	4,5	»	5,2	»
3,14	1	20/10	4,7	»	5,4	»
3,80	1	22/10	4,9	6	5,8	»
4,91	1	25/10	5,2	»	6,1	7
5,73	1	27/10	5,4	»	6,3	»
7,07	1	30/10	5,7	»	6,6	»
9,08	1	34/10	6,2	7	7,1	8
2,69	7	7/10	5,1	6	5,5	6
3,52	7	8/10	5,4	»	5,8	»
4,45	7	9/10	5,8	»	6,1	7
5,50	7	10/10	6,1	7	6,4	»
6,65	7	11/10	6,3	»	6,7	»
7,92	7	12/10	6,6	»	7,0	8
9,29	7	13/10	6,9	8	7,4	»
10,80	7	14/10	7,2	»	7,8	»
12,40	7	15/10	7,4	»	8,2	10
14,10	7	16 10	7,8	»	8,6	»
15,90	7	17/10	8,3	9	9,2	»
17,80	7	18/10	8,4	»	9,8	»

HILOS			CONDUCTORES AISLADOS PARA 110 VOLTS. Aislamiento: 300 megohms		CONDUCTORES AISLADOS PARA 220 VOLTS. Aislamiento: 600 megohms	
Sección en mm. cuadrados	Núm. de hilos	Diámetro en mm.	Diámetro de los conductores aislados	Diámetro de las ranuras en mm.	Diámetro de los conductores aislados	Diámetro de las ranuras en mm.
19,8	7	19/10	8,7	9	10,0	12
22,0	19	12/10	9,2	10	10,5	»
25,2	19	13/10	9,7	»	11,0	»
29,2	19	14/10	10,0	12	11,5	»
33,6	19	15/10	10,5	»	12,0	15
38,2	19	16/10	11,5	»	12,5	»
43,1	19	17/10	12,0	15	13,0	»
48,3	19	18/10	12,5	»	13,5	»
53,9	19	19 10	13,0	»	14,1	»
60,0	19	20/10	13,5	»	14,8	»
65,0	37	15/10	15,0	17	15,5	17
74,0	37	16/10	15,5	»	16,2	»
84,0	37	17/10	16,0	»	17,0	20
94,0	37	18/10	16,5	»	18,0	»
105,0	37	19/10	17,0	20	19,0	»
116,0	37	20/10	18,0	»	20,0	25
128,0	37	21/10	19,0	»	21,0	»
141,0	37	22/10	20,0	25	22,0	»
154,0	37	23/10	21,0	»	23,0	»
167,0	37	24/10	22,0	»	24,0	»
182,0	37	25/10	23,0	»	25,0	30
196,0	37	26/10	24,0	»	26,0	»
212,0	37	27/10	24,5	»	27,0	»
228,0	37	28/10	25,5	30	28,0	»
244,0	37	29/10	26,5	»	29,0	»
262,0	37	30/10	27,5	»	30,0	35
299,0	61	25/10	29,0	»	32,0	»

Las molduras se fijan de antemano en la pared según el recorrido determinado por el plano de la instalación, por medio de puntas de cabeza plana introducidas en el intervalo comprendido entre dos ranuras, intervalo que debe ser por lo menos de 5 milímetros. Hay que asegurarse previamente de que las molduras no pasan sobre los tubos de gas, que serían agujereados por las puntas.

En el trazado del recorrido de los conductores hay que evitar, a ser posible, que los conductores que descienden a los interruptores o conmutadores pasen por la habitación que se trata de iluminar. Por ejemplo, si esta habitación da a un corredor, se hacen descender las molduras en el corredor hasta llegar frente al interruptor y se perfora la pared para pasar los hilos al otro lado (fig. 193). Los únicos conductores que entran en la habitación son los que van a las lámparas por el techo: estos conductores son de hilos flexibles torcidos, fijados por pequeños aisladores de hueso, o pasan por dentro de tubos empotrados en el techo (página 158).

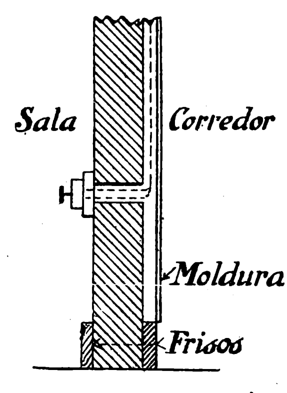


Fig. 193.

Si es imposible evitar que entren molduras en la habitación, se procurará disimularlas lo mejor que se pueda, colocándolas en la parte superior de las paredes, de modo que sean como prolongación de las molduras que adornan los techos; conviene también no limitar las molduras que contienen conductores en los puntos en que terminan estos conductores, sino que deben dar la vuelta completa al techo; una parte de

estas molduras no se utiliza, pero se suprimen así las

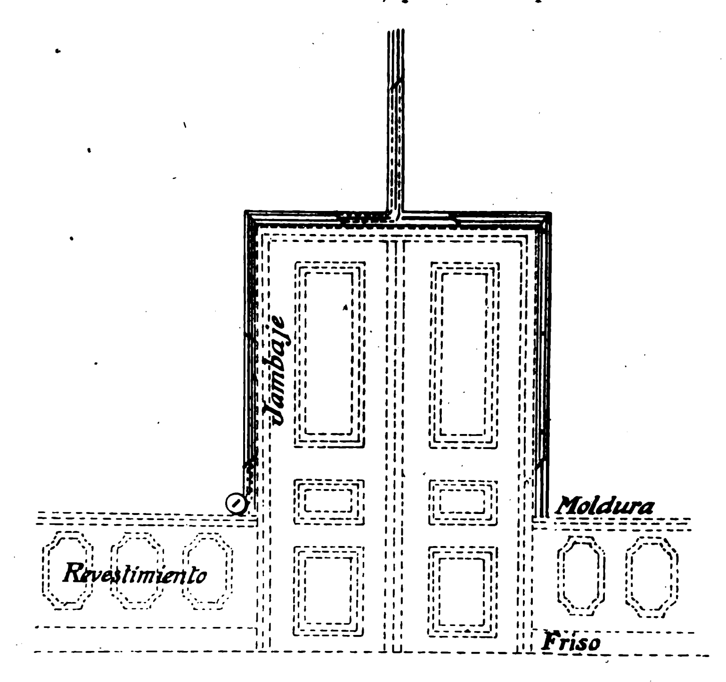


Fig. 194.

soluciones de continuidad. Análogamente, si hay que pasar por los jambajes de una puerta, se encuadra ésta completamente (figura 194); si hay que hacer una toma de corriente por encima de una puerta, por ejemplo, se coloca la moldura por encima del zócalo y se prolonga hasta el extremo de la pared (fig. 195). Si en el trayecto de la moldura se encuentra una tubería

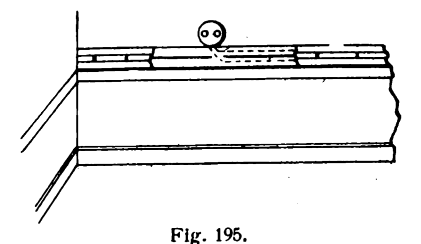


Fig. 195.

de agua o de gas, se rodea con un puente de madera fijado a la pared y sobre el puente se clavan las mol-

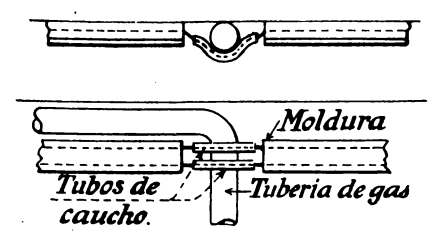


Fig. 196.

duras. Sin embargo, si la tubería es de pequeño diámetro, se corta la moldura, bastando aumentar el aislamiento de los conductores mediante tubos de caucho (fig. 196).

Las molduras se venden generalmente en trozos de 3 metros. Cuando hay que colocar unas a continuación de otras, o unirlas en ángulo recto, se cortan de modo que la sección forme un ángulo de 45° con el eje (fig. 197).

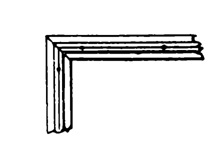


Fig. 197.

Este corte se facilita empleando una *caja de ingletes* (fig. 198). Existen también para ello tijeras especiales (fig. 199).

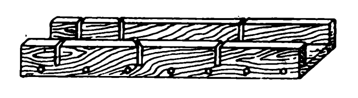


Fig. 198.

Se tiene la precaución de matar las aristas vivas de los cortes, para que los hilos no queden doblados en ángulo recto (fig. 200).

A veces las molduras tienen que seguir una curva, por ejemplo en las escaleras; entonces se les da elasticidad suficiente, por medio de cortes de sierra, tanto

más juntos y profundos cuanto más pronunciada sea la curva (fig. 201).

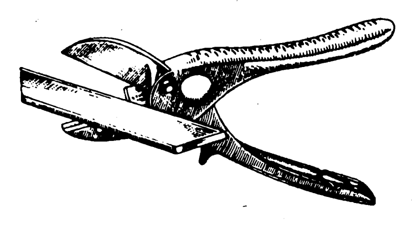


Fig. 199.

Una vez fijadas las molduras, se pasan los hilos por las ranuras y se tapan éstas; es preciso tener cuidado de que las puntas (sin cabeza) de fijación de las tapas no atraviesen la cubierta aisladora de los conductores, porque podrían romperse los hilos o ponerse a tierra por la punta. Ordinariamente hay una línea trazada sobre esta tapa, que indica el sitio donde han de clavarse las puntas; bastará clavar éstas normalmente a la superficie de las tapas, para evitar averías.

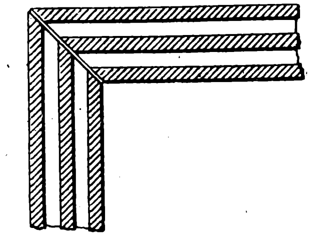


Fig. 200.

Observación. — Este sistema de montaje únicamente debe emplearse sobre paredes muy secas, teniendo mucho cuidado en no colocar molduras sobre paredes recientemente enyesadas, pues la

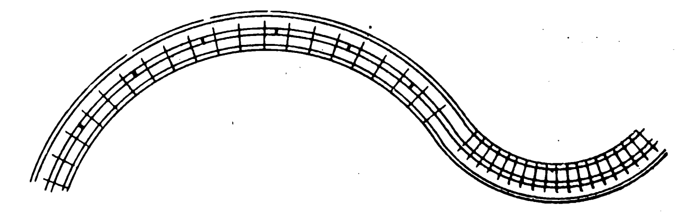


Fig. 201.

madera absorbe la humedad, que llega hasta los conductores disminuyendo su aislamiento, y empieza a

pasar una corriente de un conductor a otro a través del aislamiento y de la madera húmeda; esta corriente, aunque muy débil al principio, va alterando poco a poco las sustancias aislantes, aumentando así de un modo continuo su intensidad. Puede suceder que esta corriente alcance un valor suficiente para provocar la inflamación de la moldura, sin que hayan llegado a fundirse los fusibles de seguridad.

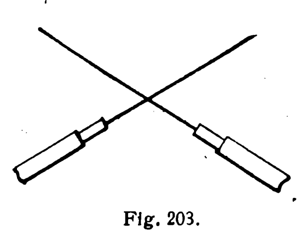
Es muy importante, por consiguiente, no emplear las molduras en lugares húmedos ni sobre enyesados frescos. Sin embargo, si las paredes sobre las cuales hay que colocar las molduras están muy poco húmedas y no de un modo permanente, se pueden emplear molduras, con la condición de separarlas de la pared por medio de tacos de madera alquitranada, dispuestos de trecho en trecho.

Empalmes. — Las uniones entre dos conductores o las derivaciones, pueden hacerse por empalmes, del modo siguiente:



Fig. 202.

Se pone al descubierto el ánima de los conductores que se han de unir, en una longitud de 7 a 8 centímetros; se quita la cubierta exterior en unos 2 centímetros más y se limpia bien el cobre con un cuchillo o con papel de esmeril (fig. 202). Las ánimas de los dos conductores se cruzan hacia los puntos medios (fig. 203), y se retuercen entre sí, de modo que cada conductor forme alrededor del otro varias espiras muy apretadas unas con otras y contra el hilo a


Fig. 203.

cuyo alrededor se arrollan (figs. 204 y 205). Después se aprietan estas espiras con los alicates.

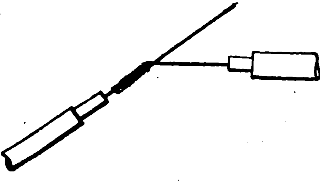


Fig. 204.

Algunos reglamentos exigen que los empalmes se suelden. Sin embargo, no se cumple siempre esta disposición, porque el uso del soldador presenta algunas dificultades considerables y requiere mucho tiempo.

Si se quiere hacer la soldadura, no se puede emplear el desoxidante ordinario, cloruro de zinc (llamado ordinariamente *ácido),* porque atacaría el ánima de cobre, debiéndose usar la *resina*. Se emplea resina en polvo, aplicándola al empalme con el soldador caliente, o bien una solución de resina en éter; se suelda después con estaño.

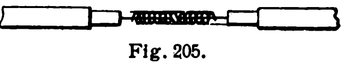


Fig. 205.

Una vez hecho el empalme, hay que aislarlo; para ello se empieza por rodearlo con una cinta de caucho natural o *guta*. Esta cinta debe empezar en la parte de aislante puesta al descubierto por haber levantado la cubierta exterior, y después de cubrir todo el empalme terminar en el otro extremo de éste, sobre el caucho (fig. 206). De este modo hay adherencia perfecta entre la cinta de caucho arrollada y el tubo de caucho que constituye el aislador del conductor; por lo tanto, si hay humedad alrededor del empalme no puede penetrar. En cambio, si se aplicara directamente la cinta de guta sobre la cubierta exterior, faltaría dicha adherencia y la humedad exterior entraría fácilmente.

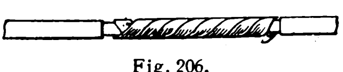


Fig. 206.

Como la cinta de guta es elástica y tiende a desarrollarse en seguida, se fija por medio de *chatterton,*

que es una cinta recubierta de una pasta formada por alquitrán, resina y gutapercha. Se arrolla, por consiguiente, sobre el empalme aislado por la guta, una cinta de chatterton cuyos extremos se pegan sobre la cubierta exterior de los conductores (fig. 207).



Fig. 207.

Para una derivación se procede de la misma manera.

Sucede con frecuencia que hay que hacer empalmes sobre dos conductores colocados en dos ranuras próximas. Como por mucho cuidado que se ponga, siempre disminuye el aislamiento en los empalmes, se procura que los dos empalmes no caigan enfrente uno del otro.

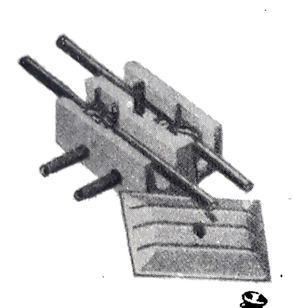


Fig. 208.

Además, el aislamiento del empalme produce un aumento en el diámetro exterior en la parte en que está hecho; es preciso ensanchar la ranura para que pueda caber, lo cual se consigue fácilmente cortando con un formón las partes de moldura adyacentes a la ranura.

Para evitar los inconvenientes de los empalmes ordinarios, se emplean a veces cajas de empalme, de porcelana (fig. 208).

Montaje de interruptores e inversores.—Los interruptores e inversores para alumbrado se montan sobre porcelana: hay muchos tipos diferentes, cuya descripción es innecesaria dada la facilidad con que se comprende su funcionamiento, con sólo observarlos detenidamente.

Los más generalizados son los representados en las figuras 209 a 214.

Cualquiera que sea el tipo, los conductores se arrollan alrededor de un tornillo, apretándolos mediante

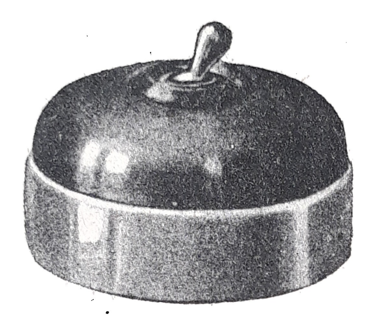


Fig. 209.
Tipo «Tumbler».

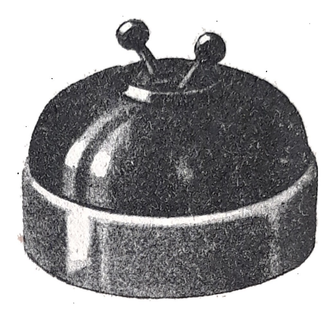


Fig. 210.
«Tumbler» de doble alumbrado.

una tuerca entre una arandela de cobre y un soporte prolongado en un contacto de láminas flexibles (fig. 215),

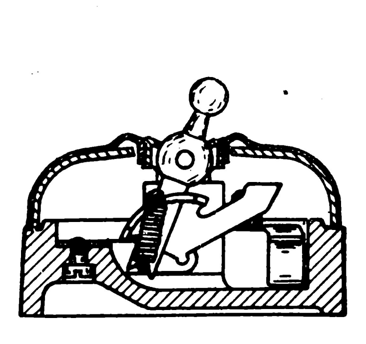
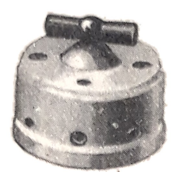


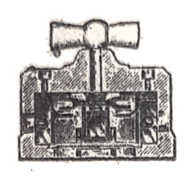
Fig. 211.
Sección de un interruptor «Tumbler».



Fig. 212.
Interruptor de botón.

o bien se sujetan dentro de un tubo de cobre unido a un contacto de láminas flexibles, apretándolos mediante un tornillo (fig. 216).





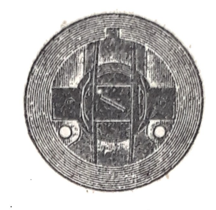


Fig. 213. — Interruptor tipo Bloc, en perspectiva, sección y vista por debajo.

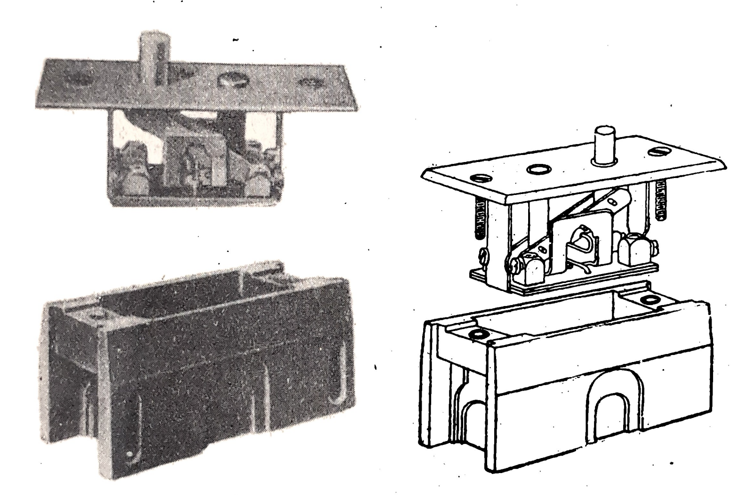


Fig. 214.

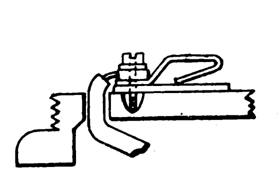


Fig. 215.

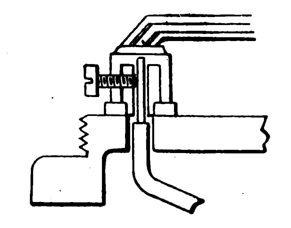


Fig. 216.

El hilo, descubierto en una longitud conveniente, se arrolla alrededor del tornillo, o se introduce en el tubo de modo que el principio del aislante del conductor llegue todo lo cerca que sea posible del contacto; la tuerca o el tornillo se aprietan bien, pero sin aplastar el cobre del conductor, y el exceso de hilo se corta con los alicates o las tijeras.

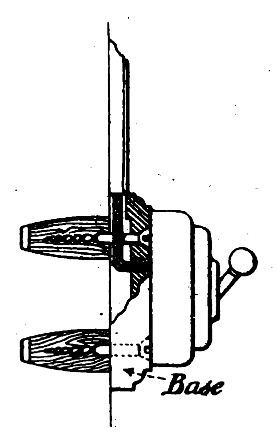
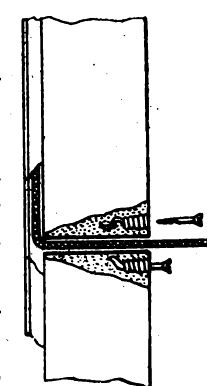


Fig. 217.

Cuando hay que arrollar el hilo alrededor del tornillo, se procura que siga el mismo sentido en que debe girar el tornillo para apretar el conductor.

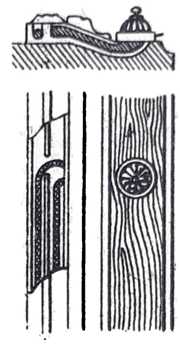
Cuando el interruptor o el inversor ha de ir colocado sobre un tablero de madera, se fija directamente por dos tornillos que pasan por los dos agujeros achaflanados practicados en la base de porcelana. Si hay que colocarlo sobre una pared, se empieza por clavar una roseta, generalmente de madera, por medio de dos tornillos que entran en dos tacos de madera, introducidos de antemano en la pared, y después se fija el interruptor o inversor mediante dos tornillos sobre la roseta (figura 217).


Fig. 218.

Puede evitarse el empleo de tacos de madera, fijando el interruptor en la pared del modo siguiente:

Se corta el papel (caso de haberlo) en dos direcciones perpendiculares entre sí, y se levantan los cuatro picos que resultan con la punta de un cuchillo; en

la parte de pared que queda así al descubierto se hace un agujero cuyo diámetro sea algo mayor que la distancia comprendida entre los dos agujeros que hay en la base del interruptor. Se pasan los dos tornillos por los agujeros de la base y se arrolla por detrás de ésta, alrededor de cada tornillo, un hilo de cobre recocido de manera que forme una hélice que tendrá exactamente el mismo paso que el tornillo (fig. 218). Se echa yeso en el agujero que se hizo en la pared y, cuando aun está fresco, se aplica el interruptor de manera que los dos tornillos, con sus hélices correspondientes, penetren en el yeso. Se deja secar el yeso, y cuando está bien fraguado, se quitan los tornillos, que dejan en la pared una rosca perfecta.


Fig. 219.

Los cuatro picos del papel se engoman y se pegan sobre la pared, colocándose a continuación el interruptor contra el papel.

Si desde un mismo punto deben encenderse y apagarse varias lámparas, se colocan los distintos interruptores sobre una misma placa o tabla.

Cuando se coloca un interruptor en la jamba de una puerta, se puede agujerear aquélla con el berbiquí para dar paso a los hilos que han de entrar en la moldura (figura 219).


Fig. 220.

Los interruptores y conmutadores pueden fijarse en el extremo de un hilo flexible, pudiendo tener distintas formas (figura 220); y el tubo flexible parte de una roseta clavada en la pared o en el techo, por medio de la cual se establece la conexión con los conductores

fijos. También hay interruptores y conmutadores en forma de botón (fig. 221), que se montan en una pared o sobre una mesa; cuando tienen forma de contacto de

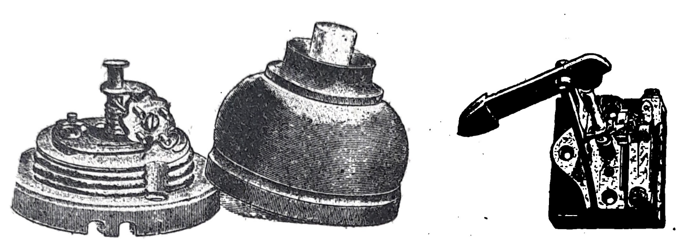


Fig. 221. Fig. 222.

puerta, se montan por encima de una puerta, de modo que se encienda la luz al abrir y se apague al cerrar (figura 222).

Montaje de los cortacircuitos.— La «Union des Syndicats de l'Électricité» preconiza las siguientes disposiciones:

a) Todo cortacircuito tendrá dos elementos principales: uno de ellos, el zócalo, empalmado de una manera fija a la canalización; el segundo, móvil y calibrado, que debe adaptarse al anterior y que contiene el cartucho fusible (barrita, tapón, etc.).

b) El elemento fijo, de sistema o intensidad de corriente determinados (modelos de tornillo, de tarugos, de bayoneta, etc.) debe estar establecido de manera tal que sea imposible adaptarle por error un elemento móvil del mismo sistema, pero correspondiente a una corriente de mayor intensidad.

c) El elemento móvil estará establecido de manera tal que el fusible sea inaccesible y la fusión no pueda producirse al aire libre.

En caso de que se funda, el cortacircuitos no podrá

ponerse nuevamente en servicio más que utilizando un nuevo **elemento móvil.**

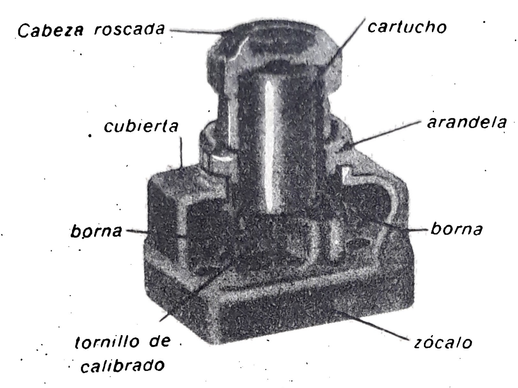


Fig. 223. — Cortacircuito unipolar de tornillo.

d) El procedimiento de soplado y las dimensiones dadas a los elementos fijo y móvil serán tales que des-

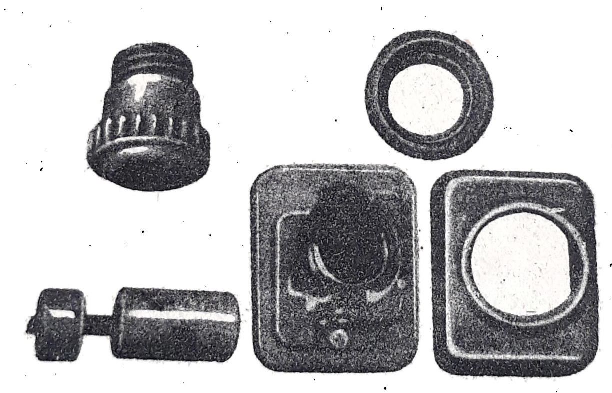


Fig. 224. — Piezas del cortacircuito de tornillo.

pués de haberse fundido el fusible no pueda persistir el arco eléctrico.

Los cortacircuitos que llenan estas condiciones son de tornillo o de tarugos.

Modelos de tornillo. — Están representados por la

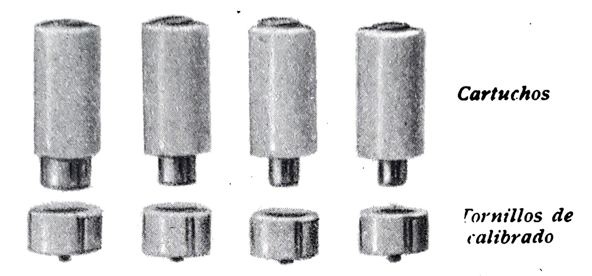


Fig. 225. — Diferentes diámetros de los tornillos

figura 223. El zócalo puede estar construído sea con orificios para el paso de hilos (montaje sobre muro) sea con bornes por la parte posterior que sobresalen de la base (montaje sobre cuadro). El cartucho contiene el hilo fusible, el cual debe ser reemplazado después de cada fusión; la cabeza sirve para mantener en su sitio el cartucho (fig. 224) y el tornillo de calibrado tiene por objeto impedir que el que lo usa pueda por error poner un cartucho que corresponda a una corriente de más intensidad. Este resultado se obtiene empleando diámetros distintos según las intensidades (figura 225).

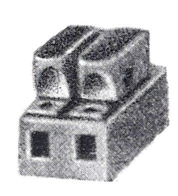


Fig. 226. Modelo de tarugos bipolar.

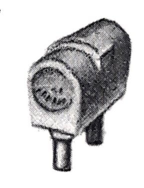


Fig. 227. Tapón con indicador de fusión.

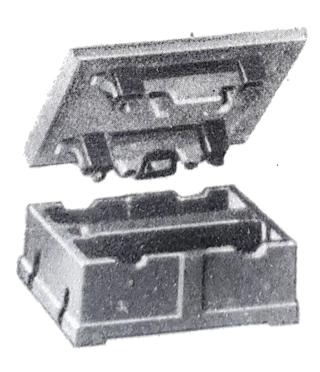


Fig. 228. Modelo de tabaquera bipolar.

Modelos de tarugos. — Están representados por la figura 226. Sus tapones pue-

den construirse con indicador de fusión. Se logra esto practicando en el tapón una abertura por la cual se ve el hilo fusible, o bien por intermedio de un visor que emerge así que el fusible se ha quemado.

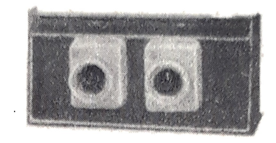


Fig. 229.
Cortacircuitos unipolares sobre cuadro metálico.

Modelo de tabaquera. — Cada día es menos empleado y algunos reglamentos prohiben su uso (figura 228).

Montaje. — Los cortacircuitos se fijarán sobre una planchuela de madera o mejor todavía sobre un cuadro metálico (fig. 229).

Tomas de corriente *(enchufes).* — Son aparatos que sirven para conectar los conductores con receptores móviles, tales como lámparas, aparatos de calefacción, etc.

Están formados de dos partes. Una fija, que es una base aisladora en cuyo interior van dispuestos dos

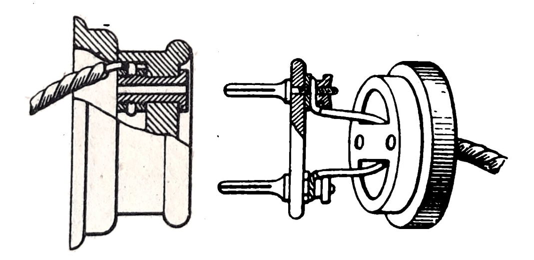
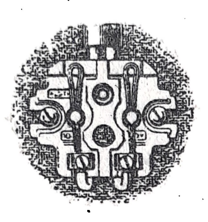


Fig. 230.

tubitos de cobre que comunican con los dos cables que conducen la corriente. La otra parte es móvil, y consiste en un manguito aislador sobre el cual van fijas dos varillas de cobre, con un corte longitudinal, para

darles cierta elasticidad y asegurar un buen contacto con los tubitos de la parte fija; los dos conductores de hilo flexible se aprietan entre dos tuercas, alrededor de las prolongaciones roscadas de las varillas.



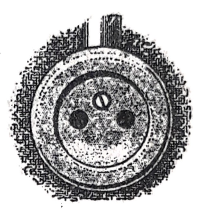
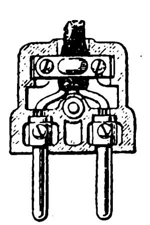


Fig. 231.

La base se monta sobre una peana de madera, como los interruptores; los dos conductores están apretados, en general, por detrás de la base, entre dos tuercas, alrededor de una varilla fileteada, prolongación de los tubitos (fig. 230).

Hoy se construye un modelo de toma de corriente cuya colocación es muy fácil, por el hecho de que su



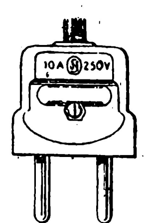


Fig. 232.

zócalo se compone de dos piezas y la cubierta no se pone hasta después de terminadas las conexiones: el zócalo se fija al muro después de hacer pasar los conductores por debajo de la porcelana al hueco previsto a este efecto, y después se coloca la cubierta (fig. 231).





Fig. 233. — Enchufe ordinario.

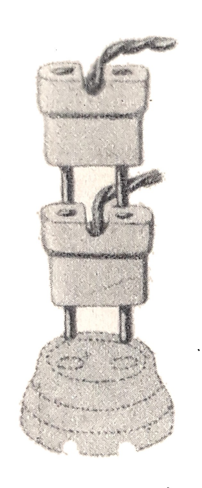


Fig. 234. Enchufe múltiple.

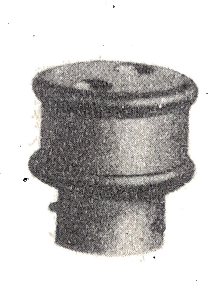


Fig. 235. — Intermediario entre un macho de enchufe y un portalámparas.

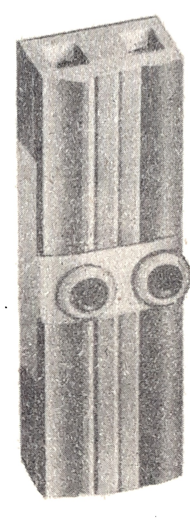


Fig. 236. Enchufe bajo moldura.

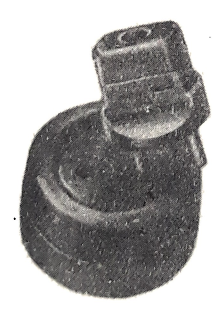


Fig. 237. Enchufe desmontable.

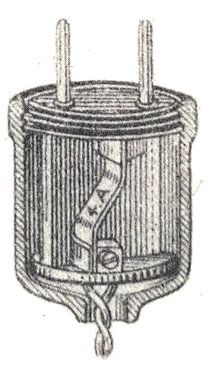


Fig. 238. Enchufe con fusible interior.

Algunos tienen la mala costumbre de sacar el enchufe tirando del cordón; por tanto, es preciso hacer el montaje de manera tal, que por efecto del esfuerzo de tracción ejercido sobre el cordón no puedan arrancarse las conexiones y producirse cortocircuitos.



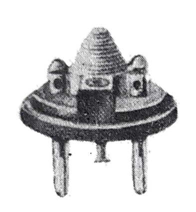


Fig. 239. Enchufe con apretado automático de los conductores.

La figura 232 representa un dispositivo de blocaje ideado con este objeto y en el cual los hilos quedan sujetos por un tornillo de seguridad, y en la figura 239 se ve un dispositivo de blocaje automático en el que los hilos se encuentran apretados entre el cono central y la cubierta de las clavijas.

Montaje de las lámparas. — 1.° *Lámparas de suspensión fija.* — Los conductores que llevan la corriente a la lámpara entran en una *roseta de techo* que tiene la forma representada en la figura 240, si el hilo que desciende a la lámpara es el mismo que el hilo de llegada de la corriente; en caso contrario, la roseta tiene la forma indicada en la figura 241.

La roseta se fija en el techo por medio de tornillos que entran en una vigueta o traviesa; pero si por el punto donde hay que suspender la lámpara no pasa ninguna vigueta, no basta con fijar la roseta sobre el cielorraso, que no ofrece resistencia suficiente. En este caso se fija la roseta sobre una rodaja de madera, por detrás de la cual se colocan varios tornillos del modo representado en la figura 242; se abre un agujero, de diámetro algo menor que el de la rodaja, en el techo, y se tapa después con yeso. Se aplica en seguida la rodaja, de modo que los tornillos penetren en el yeso, y se deja secar.

Para que los esfuerzos de tracción producidos por el peso de la lámpara y sus guarniciones no se transmitan a los puntos de amarre de los conductores, se anuda el hilo dentro de la roseta y del casquillo (figura 240).

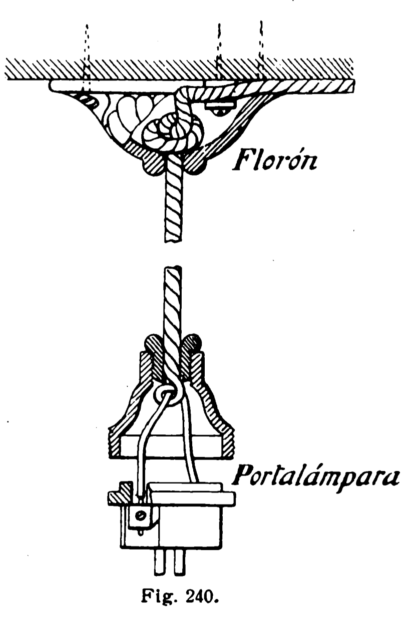


Fig. 240.

Este procedimiento tiene el inconveniente de que hace depender de la fijación de la cubierta la seguridad de todo el aparato.

Para evitarlo se empleará preferentemente un sistema tal como el representado por las figuras 243 y 244, en el que los hilos flexibles están apretados fuertemente, por una plaquita especial que se atornilla en el zócalo debajo de los puntos de conexión, contra una protuberancia central de este último (modelo de la «Fabrique d'appareillage électrique»).

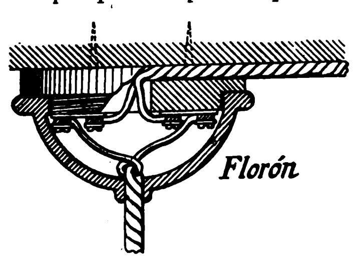


Fig. 241.

A veces se atornilla sobre el casquillo un enlace que lleva un anillo, y el hilo de suspensión, trenzado con el cordón de hilos conductores, se amarra alrededor de este anillo.

También se puede disponer la lámpara en el extremo de un hilo suspendido de un gancho.

2.° *Suspensión móvil.* — La lámpara puede subir o bajar por medio de un contrapeso: el cordón de suspensión comprende los dos hilos de llegada de la corriente, ya retorcidos como indican

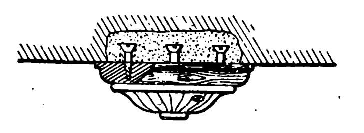


Fig. 242.

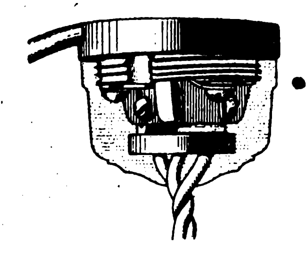


Fig. 243.

las figuras 245 y 246, o separados (fig. 247). El equilibrio de la lámpara y su guarnición se obtiene con un peso, o con granos de plomo contenidos en el contrapeso.

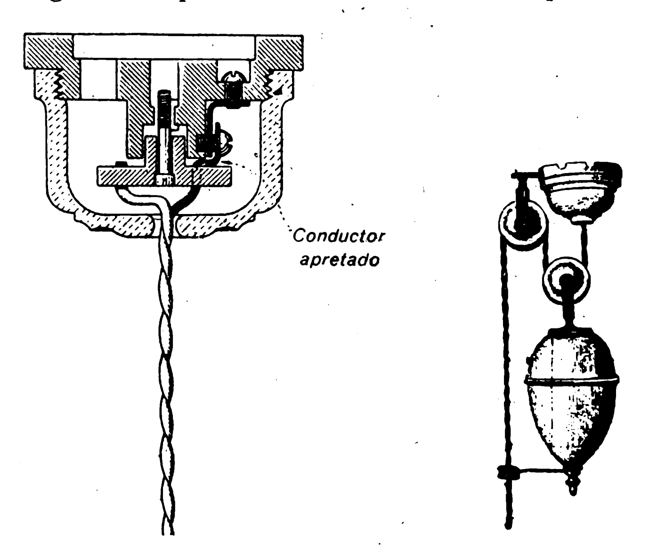


Fig. 244.

Fig. 245.

Instalación de las arañas. — Las arañas se venden, de ordinario, completamente equipadas; los conductores

se pasan por los tubos que las forman, al tiempo de hacer el montaje. Sin embargo, hay veces que se tiene que hacer esta instalación, ya porque se quieran modificar las agrupaciones de las lámparas, o porque haya que utilizar una antigua araña o lámpara de petróleo o de gas.

A veces es necesario desmontar completamente la araña para poder pasar los hilos. Pero es posible, sin embargo, en ciertos casos, evitar este trabajo; para ello se pasa por los tubos un cordón fino y resistente, amarrando en uno de sus extremos una bola pequeña de plomo; esta bola (o perdigón) sigue fácilmente las sinuosidades de los tubos y puede llegar al punto que se desee; bastará entonces amarrar con seguridad en el otro extremo del cordón el hilo que se quiere pasar y tirar poco a poco; teniendo cuidado, se pasan con facilidad todos los conductores. También se puede utilizar un alambre o cinta de acero (pág. 198).

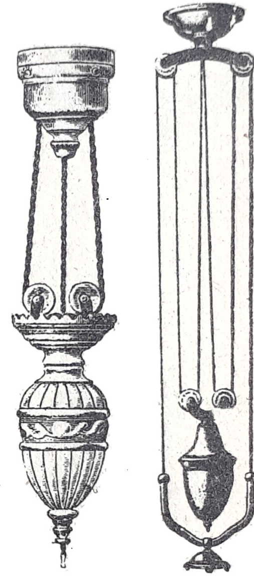
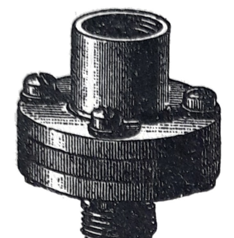


Fig. 246. Fig. 247.

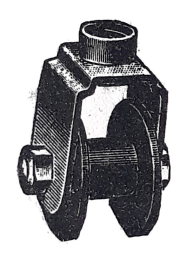
Cuando no es posible introducir los conductores en los tubos, se colocan siguiendo los contornos exteriores de la araña; para facilitar el montaje se emplean hilos planos de dos conductores cuya cubierta es de seda amarillo de oro, cobre o bronce, y se sujetan de trecho en trecho con ligaduras; se encolan sobre los brazos de la araña y se quitan las ligaduras cuando se ha secado la cola. Los hilos entran por un agujero practicado en el casquillo de cada lámpara y se protegen mediante una

envoltura contra la ruptura que podrían producir las aristas vivas del cobre del casquillo.


Fig. 248.

Los extremos de los conductores se unen a los hilos de llegada de la corriente mediante bornes aislados en cajas de porcelana.

Es conveniente aislar las arañas de la tierra mediante suspensiones aislantes. Cuando el aparato se fija en el extremo de una tubería de gas, se emplea un enlace aislador (figura 248); entre los dos discos de cobre hay un disco aisla-


Fig. 249.

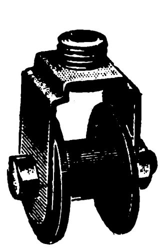
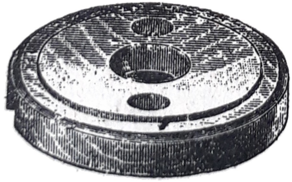
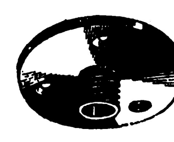
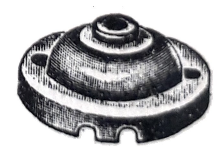

Fig. 250.


Fig. 251.

dor y los tornillos de fijación están aislados de los discos por medio de redondelas y tubos aisladores.


Fig. 252.


Fig. 253.


Fig. 254.

También se cuelgan las arañas por medio de ganchos aisladores que tienen las formas representadas por las figuras 249 a 251.

Lámparas colocadas directamente en el techo o en las paredes. — Se fijan las lámparas directamente en el techo, atornillando el casquillo sobre un disco de

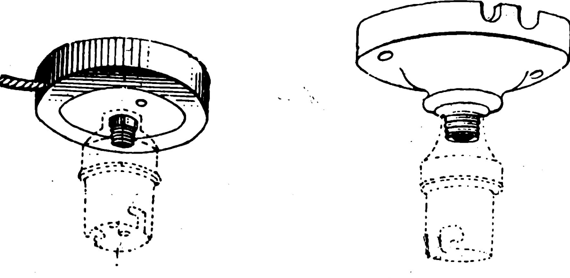


Fig. 255. Fig. 256.

latón que lleva un manguito roscado en el centro y que está unido a una rodaja fijada en el techo (figuras 252 a 256).

Para las paredes se emplean brazos fijados sobre rodajas adecuadas (figs. 257 y 258).

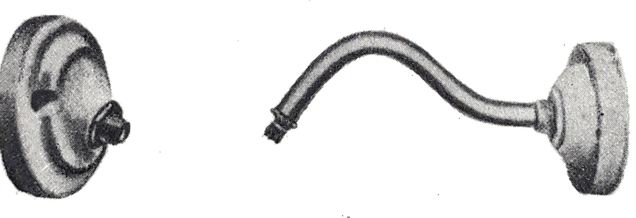


Fig. 257. Fig. 258.

Montaje del casquillo y de las guarniciones de la lámpara (figs. 259 a 263). — Cuando hay que colgar la lámpara en el extremo de un hilo flexible se empieza por introducir el hilo en un enlace de madera o de cuerno, después el portapantalla y el casquillo, que se atornilla sobre el enlace de modo que quede bien apretado el portapantalla. Los extremos descubiertos de los

hilos se introducen en los agujeros practicados en la porcelana del casquillo, de manera que el aislante de los conductores entre un poco en estos agujeros; se aprietan

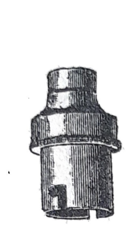


Fig. 259.
Casquillo de un solo anillo.

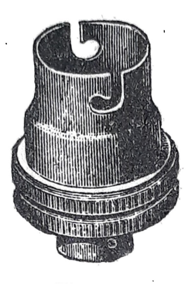


Fig. 260.
Casquillo de doble anillo

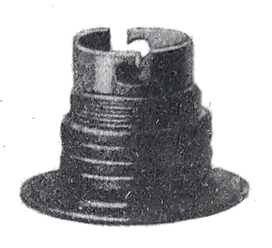
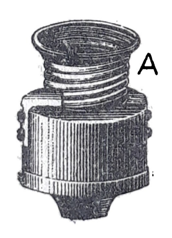


Fig. 261.
Casquillo de base atornillable.

los tornillos y se cortan las partes sobrantes de los hilos. Es preciso tener cuidado de que ninguno de los hilos que componen cada conductor salga por fuera del soporte de porcelana, porque podría producirse un



B A C

Fig. 262.
Casquillo de rosca tipo Edison.

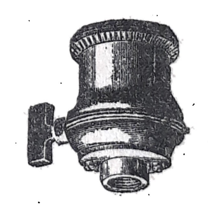
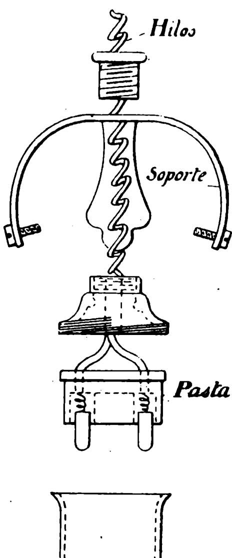


Fig. 263.
Casquillo de llave.

cortocircuito con el otro hilo o con el tubo del casquillo. Después se baja el casquillo de manera que se adapte contra la porcelana que se introduce entonces en el tubo. Por último, se pasa el anillo que, atornillado sobre el casquillo, sujeta el conjunto de todas las piezas (figura 264).

Si se emplean casquillos de doble anillo, no se coloca el portapantalla entre el casquillo y el enlace, sino entre los dos anillos.



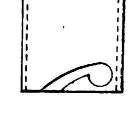




Fig. 264.

Finalmente, se sujeta la pantalla con los tornillos de los extremos del portapantalla.

Sucede con mucha frecuencia que, a causa de trepidaciones del techo, se aflojan estos tornillos, siendo muy fácil que la pantalla pueda caer.

Se evita este peligro cortando en bisel, con la lima, las puntas de los tornillos y apoyando la garganta de la pantalla sobre el plano así formado (fig. 265). En estas condiciones, los tornillos no pueden girar, por impedirlo la pantalla que descansa sobre ellos.

A veces no se emplea portapantalla, sujetándose entre los dos anillos una pantalla sin garganta.

Se puede transformar una lámpara cualquiera de gas o de petróleo en eléctrica, por medio de un enlace que lleva dos roscas: una que puede atornillarse

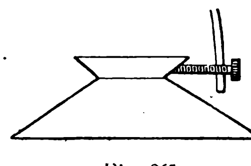


Fig. 265.

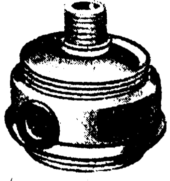


Fig. 266.

en la lámpara y la otra con el mismo paso que la rosca del casquillo.

En uno de los lados del enlace hay un agujero aislado para la entrada de los hilos (fig. 266).

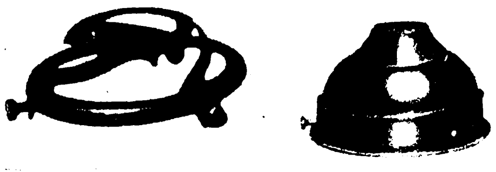


Fig. 267. Fig. 268.

c) *Montaje bajo tubos visibles*

Se emplean para este montaje tubos formados por tiras de papel impregnadas de sustancias aislantes muy poco combustibles; se recubren exteriormente con una armadura ligera constituída por una hoja de latón o de palastro emplomado. Estos tubos los construyó

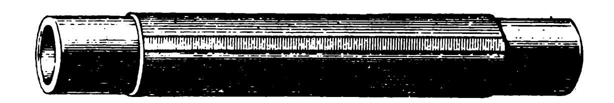


Fig. 269.

por primera vez la Sociedad Bergmann y se designan ordinariamente con el nombre de *tubos Bergmann*.

En el comercio se venden estos tubos en trozos de 3 metros y de diámetros interiores iguales a 7, 9, 11, 13, 16, 23, 29, 36, 42 y 48 milímetros.

Los diámetros de los tubos empleados se escogen de manera que los conductores puedan entrar y salir fácilmente, para lo cual dichos tubos deben tener un diámetro igual por lo menos al doble del diámetro exterior de los conductores. Es conveniente no pasar más que un hilo por cada tubo, aunque a veces se pueden

pasar varios de igual polaridad por un mismo tubo, por ejemplo, para la llegada a los interruptores; en este caso, el diámetro del tubo deberá ser mayor, por lo menos en 5 milímetros, que la suma de los diámetros exteriores de todos los hilos.

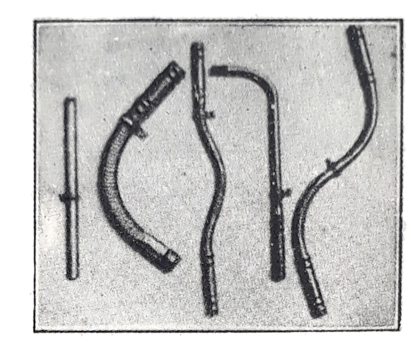


Fig. 270.

Para dar a las líneas formas sinuosas o cambios de dirección, se construyen tubos acodados de distintos radios de curvatura, que bastan, en general, para seguir todos los trazados (figura 270). Sin embargo, en algunos casos es necesario un tubo con una curvatura especial difícil de encontrar en los almacenes; para dar a un tubo recto la forma necesaria se utilizan unos alicates especiales.



Fig. 271.

Uno de los brazos de estos alicates lleva una garganta a la cual se adapta exactamente el tubo, y el otro una arista que entra un poco en la garganta cuando los alicates están cerrados.

Se calienta ligeramente el tubo y se coloca en la gar

ganta, cerrando los alicates; la arista raya la armadura y dobla el tubo. Haciendo de este modo una serie de cortes, el tubo se curva, siendo la curvatura tanto más acentuada cuanto más cerca están unos cortes de otros.

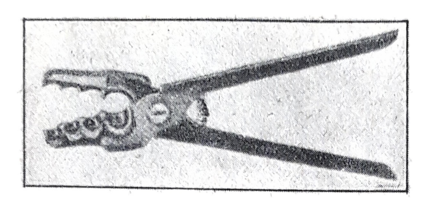


Fig. 272.

De esta manera sería preciso tener unos alicates para cada diámetro de tubo; se ha salvado esta dificultad con unos alicates en que se puede variar el diámetro de la garganta en que se aloja el tubo, pudiendo al mismo tiempo regular la posición de la arista para hacer las rayas o cortes más o menos profundos (fig. 271).

También hay alicates de varias gargantas (fig. 272) o de cojinetes intercambiables.

Colocación de los tubos. — Los tubos se fijan sobre las paredes por medio de corchetes de latón o de hierro galvanizado. Pueden disimularse bajo la tapicería, sin necesidad de introducirlos en la mampostería, practicando en el enyesado canales de diámetro un poco mayor que el de los tubos. Se fijan éstos con los corchetes ordinarios o con horquillas, cubriéndolos con la tapicería. Para las horquillas convendrá utilizar la herramienta representada en la figura 123.

Uniones y derivaciones. — Cuando hay que colocar varios tubos, unos a continuación de otros, se unen por medio de *manguitos*. Los manguitos son tubos de latón en cuyo interior hay dispuestas unas gargantas llenas de una materia aisladora, que puede fundirse con el calor de la llama de una lámpara de soldar (fig. 273).

Para unir estos tubos se opera del modo siguiente: se empieza por levantar, en los extremos de los dos tubos que se han de unir, 1 ó 2 centímetros de la cubierta metálica con la arista viva de una lima triangular, con la hoja de un cuchillo o con una herramienta especial (figura 274).

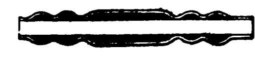


Fig. 273.

Para utilizar esta herramienta se introduce en el tubo el calibre *c*, de modo que la rueda cortante *r* se apoye sobre la cubierta; se hace girar la herramienta y la rueda *r* hace una señal sobre la armadura de latón, que se desprende entonces fácilmente. Sobre las partes del tubo de cartón que quedan al descubierto se aplica un poco de materia de la misma clase que la que hay dentro del manguito y se enchufan los dos tubos en el manguito de modo que se toquen en el punto medio de éste. Se calienta el manguito con una lamparilla de alcohol (u otra cualquiera), la materia aislante se funde y entra en los huecos comprendidos entre el manguito y los tubos, formando al enfriarse una unión persistente (fig. 275).

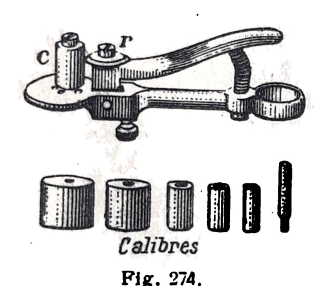


Fig. 274.

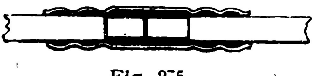


Fig. 275.

Los tubos no deben unirse en longitudes mayores de 18 metros, porque sería imposible pasar los hilos por dentro. Cada 18 metros por lo menos se intercalan *cajas de empalme,* uniéndose los tubos con la caja del modo representado en la figura 276.

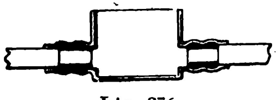


Fig. 276.

Si el recorrido que han de seguir los conductores

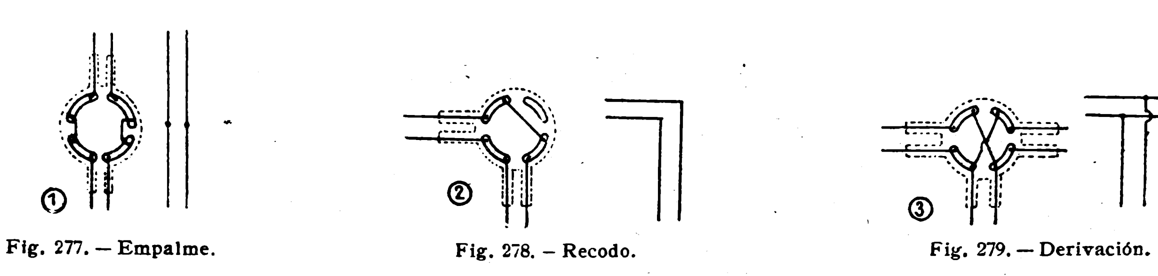


Fig. 277. — Empalme.

Fig. 278. — Recodo.

Fig. 279. — Derivación.

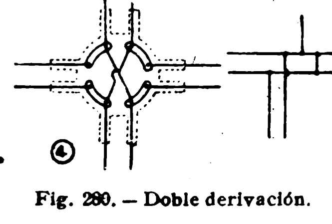


Fig. 280. — Doble derivación.

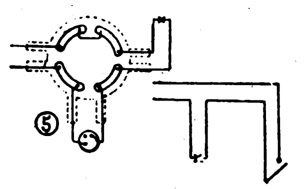


Fig. 281. — Derivaciones para una lámpara o grupo de lámparas en paralelo y para un interruptor unipolar.

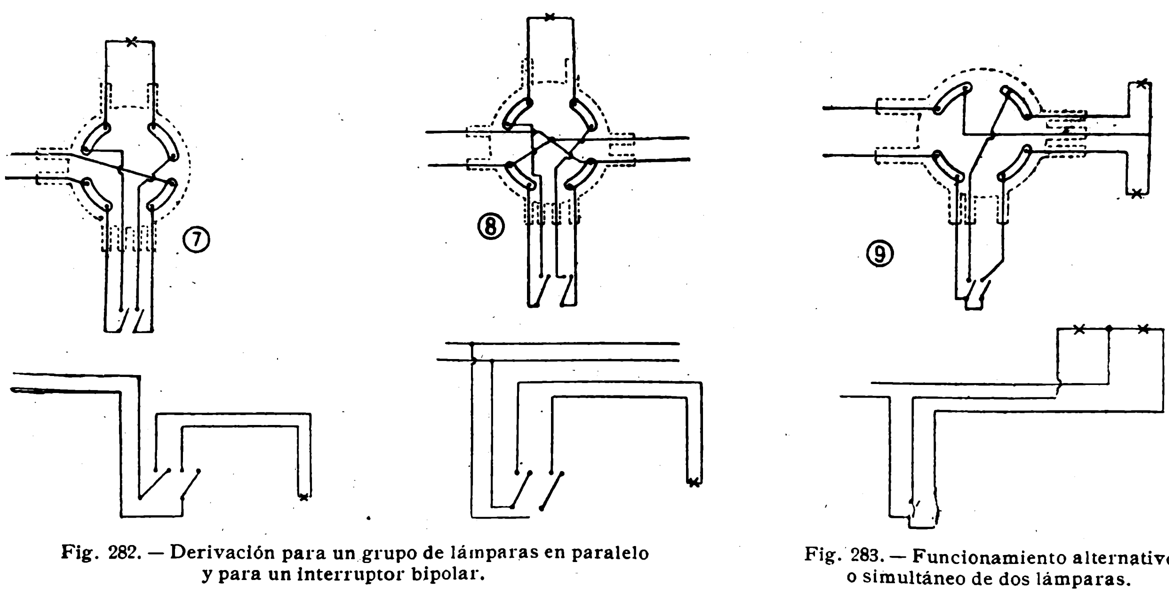


Fig. 282. — Derivación para un grupo de lámparas en paralelo y para un interruptor bipolar.

Fig. 283. — Funcionamiento alternativo o simultáneo de dos lámparas.

tiene codos, será preciso emplear mayor número de cajas de empalme, para poder pasar los hilos por el interior; no deberá haber más de cuatro curvas entre dos cajas, y menos si las curvaturas son muy acentuadas.

Las derivaciones se hacen en cajas que llevan embocaduras cuyo número y situación se adapta a los diferentes casos que se presentan (figs. 277 a 283); estas cajas pueden estar provistas de placas de conexiones cuyos soportes de porcelana se pueden fijar en los fondos por medio de un tornillo o de mástique.

Estas cajas se unen a los tubos con enchufes, del modo ya indicado. Para que los enchufes estén en la prolongación de los tubos habrá que rebajar un poco la pared para que entre el fondo de la caja. Se tapan las cajas, una vez pasados los hilos, con la tapicería o con una tapadera que se fija a bayoneta.

En las instalaciones en que hay muchos conductores, y por consiguiente tubos contiguos, es más cómodo a veces fabricar cajas de madera en que se hacen las uniones y derivaciones. Se dan a estas cajas las formas y dimensiones convenientes y se practican en ellas agujeros cuyo número y posiciones facilitan considerablemente los montajes.

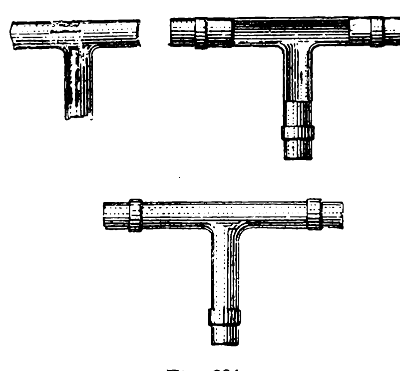


Fig. 284.

También se utilizan en locales muy secos piezas en forma de T (fig. 284); estas piezas se fijan a los tubos del modo indicado, están abiertas en la parte donde hay que hacer la derivación y llevan anillas que pueden resbalar sobre

cada rama. Cuando se han colocado los hilos se cierra el tubo por medio de una cubierta sujeta por las anillas.

Precauciones contra la entrada de la humedad en los tubos. — Es esencial en el montaje con tubos tomar precauciones para que el agua no pueda entrar ni detenerse en ningún punto de los mismos.

El agua puede entrar al hacer la instalación, en el caso de una pared en construcción, por ejemplo, o por condensación del vapor arrastrado por una circulación de aire húmedo dentro de los tubos.

Para evitar la entrada de la humedad al hacer la instalación, bastará cerrar durante los descansos y paradas del trabajo los extremos de los tubos ya colocados. Cuando se acaba la instalación y las paredes y techos están completamente secos y enyesados, se dejan las cajas abiertas el mayor tiempo posible.

Si una columna de tubos parte de un sitio frío y húmedo, por ejemplo de un sótano, y llega a los sitios más calientes, se deja el extremo superior abierto y se encorva para que el aire exterior no entre en los tubos y para que el agua condensada no vuelva a caer en el interior; se cierra el extremo inferior para evitar todo lo posible esta circulación y la introducción de vapor de agua. Si los dos extremos de la canalización dan a sitios muy secos, es preferible dejarlos abiertos para establecer una corriente de aire seco que arrastre la humedad introducida al hacer la instalación. Por último, se procurará dar a los tubos una cierta pendiente para favorecer la circulación del aire y hacer posible la salida del agua en el caso de que se haya producido una gran condensación.

Tirado de los hilos. — Cuando están colocados los tubos y las cajas de unión y derivación, se empieza por

pasar por los tubos un tapón de algodón en rama, para quitar el agua que hubiera podido depositarse en las paredes internas, y después se hace el tirado de los hilos.

Para ello se fija el hilo que se ha de pasar en el extremo de una cinta de acero (fig. 285) y se introduce la cinta por el otro extremo en los tubos, partiendo de una caja. La cinta sigue fácilmente el recorrido de los tubos y sale por la caja siguiente, donde se coge y tira hasta tener el hilo. Así se opera, en toda la longitud de la línea, de una caja a otra. Las cintas tienen 10 ó 20 metros de longitud y están provistas en un extremo de una pequeña bola y en el otro de un ojal. La bola puede resbalar fácilmente en los codos y el ojal sirve para amarrar el hilo.



Fig. 285.

Observación. — Para que resbalen con facilidad los hilos es conveniente insuflar en los tubos, y particularmente en los codos, polvo de talco.

Nunca se debe tirar de hilos empalmados, y por consiguiente los empalmes deben hacerse exclusivamente en las cajas.

Paso de los tubos por los techos. — Cuando se proyecta la instalación al mismo tiempo que la construcción del edificio, se colocan los tubos entre el suelo y el cielorraso del piso inferior. Pero, en el caso contrario, el paso de los tubos dentro de los techos es bastante difícil y a veces imposible.

Se empieza por determinar, observando el entarimado, la dirección de los ristreles (los cuales descansan sobre las paredes maestras, o si la distancia entre estas paredes es demasiado grande, sobre vigas; y distan entre sí generalmente 33 centímetros entre ejes). Las tablas del entarimado se fijan sobre los ristreles, que

por consiguiente son perpendiculares a la dirección de las tablas; los tubos no pueden colocarse más que entre dos ristreles y por lo tanto perpendicularmente a la dirección del entarimado (fig. 286).

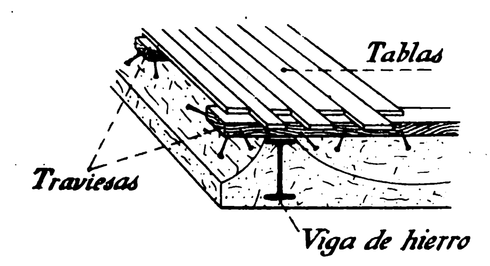


Fig. 286.

Puede suceder que las tablas estén clavadas sobre ristreles que descansan sobre viguetas, que es el caso de armazón de hierro. En este caso, las tablas están colocadas paralelamente a las viguetas.

Antes de empezar a perforar, es preciso darse cuenta, mediante sondeos, de la construcción del techo.

Si las condiciones en que se hacen los trabajos lo permiten, se levanta en el piso superior una tabla en el punto conveniente, generalmente hacia el centro del techo, y se introduce el tubo después de haberle dado una cierta curvatura, y después de haber pasado los hilos (fig. 287). Será muy fácil hacer pasar uno de los extremos por un agujero practicado en el centro del techo; para alcanzar el otro extremo, se practica una abertura suficiente para pasar el brazo por el techo junto a la pared y en el punto en que aquél deba terminar. Si esta pared es un tabique delgado y da a un corredor, por ejemplo, se hace la abertura en el exterior de la habitación de que se trate, en el corredor, siendo necesario entonces atravesar la pared (figura 288). En cambio, si la pared es gruesa y de mate-

riales duros, o separa la habitación en que se hace la instalación, de otra habitación que requiere los mismos

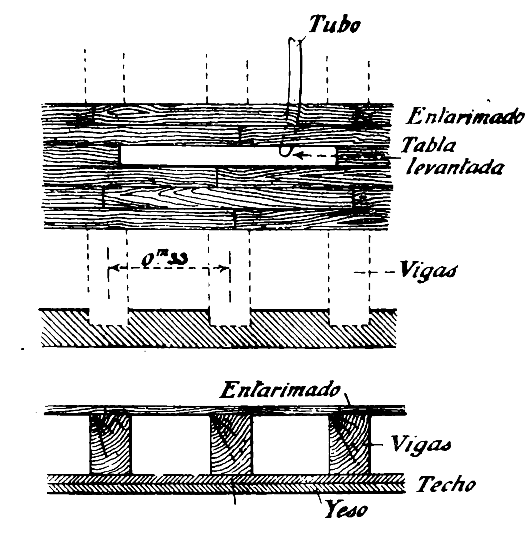


Fig. 287.

cuidados que la primera, se hace la abertura en el interior de ésta.

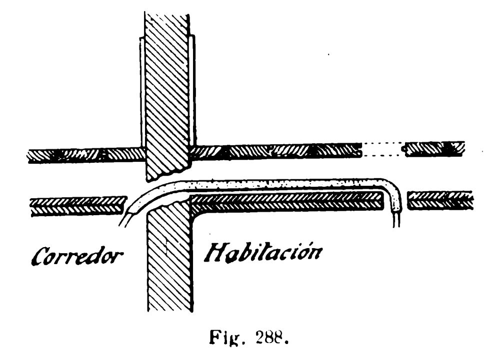


Fig. 288.

Cuando no es posible levantar una tabla del piso superior, basta hacer en el centro del techo una aber-

tura suficiente para introducir el tubo convenientemente curvado.

Observación. — A veces es necesario pasar un hilo dentro de un tubo de plomo, en lugar de un tubo ordinario; para facilitar la operación se empieza por pasar por el agujero practicado en el centro del techo una lámina flexible de acero y se tira de esta lámina a la que va unido el tubo de plomo con el hilo.

Interruptores y conmutadores, tomas de corriente, cortacircuitos. — Estos aparatos se montan sobre una roseta que presenta una garganta en la que entra el extremo del tubo.

También se emplean interruptores cuyo zócalo presenta una garganta en la que penetran los tubos (fig. 289) y aparatos provistos de enchufes como las cajas de unión o de derivación.

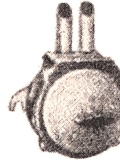


Fig. 289.

d) Montaje bajo tubos empotrados en las paredes

Se emplean en este caso tubos aisladores recubiertos de láminas de acero emplomado, y su montaje se hace como hemos dicho para los tubos visibles.

En este caso, las cajas de unión o de derivación, los interruptores, cortacircuitos, tomas de corriente, se incrustan en las paredes.

Montajes diversos

Tubos acorazados de acero. — Cuando las instalaciones requieren una gran protección mecánica (exterior, túneles, minas, etc.) se emplean tubos de acero estirado sin soldadura, aislados interiormente. Estos tubos, que se expenden en trozos de 3 metros, están roscados en los dos extremos y se unen por medio de

manguitos como una canalización de agua o de gas; existen para ellos los mismos accesorios, codos, cajas, etc., que para los otros tubos.

Los empalmes se hacen estancos mediante albayalde y una guarnición de estopa de cáñamo.

La armadura de las cajas es de fundición y su cierre es de bayoneta o hermético; en este último caso, las tapaderas están atornilladas sobre las cajas, interponiendo una placa de caucho.

Las herramientas especiales empleadas en esta clase de montaje son: una terraja, un cortatubos y un torno de tubos. Los tubos se cortan primero, se filetean y se empalman siguiendo el trayecto de los conductores; se desmontan después, se pasan los tubos y se colocan definitivamente. Cuando se corta un tubo es preciso, antes de unirlo, fresar el interior para quitar los salientes que podrían cortar el aislador de los conductores.



Fig. 290.

El montaje de lámparas con sus interruptores, y demás aparatos, se hace con esta clase de tubos del modo indicado para los otros.

Alumbrado de los talleres. — El alumbrado fijo puede no ser suficiente para ciertos trabajos; en este caso se hace que puedan moverse varias lámparas de modo que los obreros puedan llevarlas a los puntos convenientes. Para ello se dispone, por encima de las máquinas, conductores al descubierto, de los cuales pueden colgarse lámparas por tomas de corriente en forma de ganchos o poleas. Estas lámparas, llamadas *corredizas*, pueden de este modo resbalar a lo largo de los conductores (fig. 290).

También se emplean lámparas con soporte magnético. La corriente que alimenta la lámpara pasa por el carrete de un electroimán; en estas condiciones, una vez encendida la lámpara se adhiere en cualquier posición a toda pieza de hierro contra la cual se aplique el soporte (figura 292).

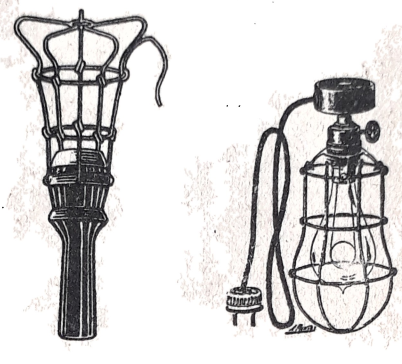


Fig. 291. Fig. 292.

Las lámparas se protegen contra los golpes con una alambrera.

Suspensión de las lámparas de arco. — Cuando el recambio de los carbones se hace por medio de una

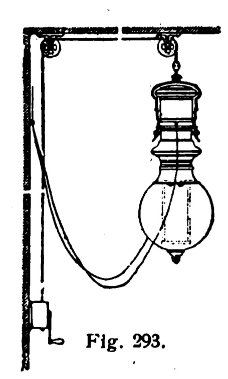


Fig. 293.

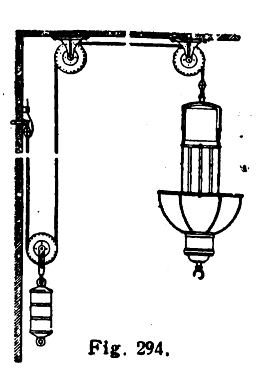


Fig. 294.

escalera, las lámparas están colgadas de un gancho. Pero, si se quiere evitar el empleo de una escalera, se cuelgan en el extremo de un cable de acero de modo que se pueda bajar hasta la altura de un hombre: esta

maniobra se efectúa mediante un tambor a cuyo alrededor se arrolla el cable, cuyo movimiento está guiado por dos poleas (fig. 293).

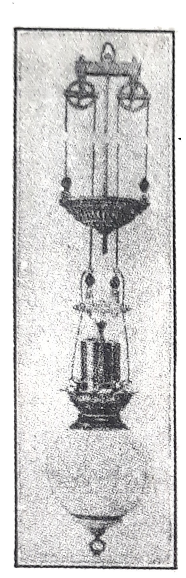


Fig. 295.

Un trinquete que se embraga a mano permite detener la lámpara a la altura que se quiera. Los conductores que llevan la corriente deben tener longitud suficiente para seguir la lámpara.

También puede utilizarse un contrapeso; en un mismo trenzado están dispuestos el cable de suspensión y el cable de conductores para la corriente. En la parte inferior de la lámpara se fija un anillo, que permite, mediante un gancho, subir o bajar la lámpara (fig. 294).

Para evitar el tener que arrollar los cables, se construyen lámparas de suspensión diferencial con contrapeso y con cable, que contiene bajo una misma cubierta los hilos de suspensión (de acero) y los conductores (fig. 295).

Instalación en locales húmedos. — CONDUCTORES. — El procedimiento más seguro consiste en el montaje de hilos desnudos sobre aisladores. A veces se emplean tubos aislantes de acero estirado sin soldadura.

APARATOS. — Las boquillas, interruptores, cortacircuitos, etc., deben cerrar perfectamente para impedir que entre humedad en las partes metálicas y en los contactos.

Boquillas y armaduras. — Las boquillas herméticas son de porcelana y tienen la forma representada en la figura 296; las lámparas están encerradas en globos de vidrio (figs. 297 a 299).

Interruptores. — Cuando la línea está tendida sobre

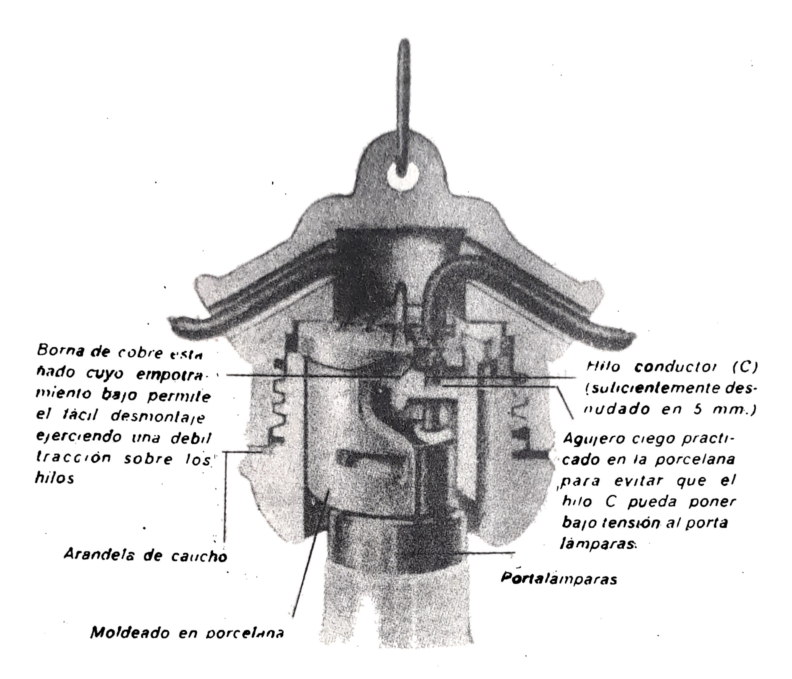


Fig. 296. — Sección de una boquilla estanca.



Fig. 297
Armazón de suspensión estanca.

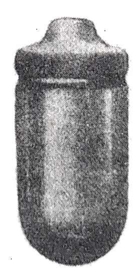


Fig. 298.
Armazón estanca de porcelana roscada.

campanas, se emplean preferentemente interruptores unipolares montados **también** sobre campanas. Tam-

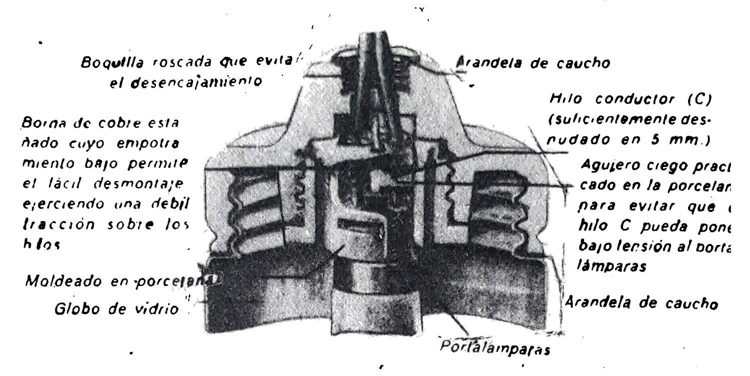
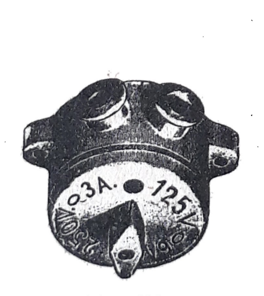
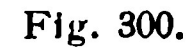


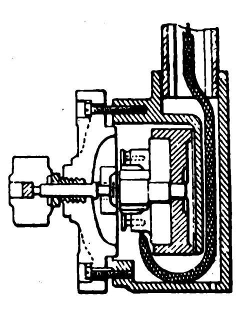
Fig. 299. — Sección de una armazón estanca.

bién se usan interruptores herméticos de porcelana (figura 300) o de fundición.

Cuando la instalación va dentro de tubos, estos tubos entran en la caja de fundición que contiene el




Fig. 300.


Fig. 301.

interruptor, en la parte inferior de la cual hay una cámara con un orificio para dar salida al agua condensada (fig. 301).

Cortacircuito. — Si la instalación está hecha con hilos tendidos sobre campanas, se emplean cortacir-

cuitos de diversas formas (fig. 302). Si está hecha con tubos, se encierran éstos en cajas herméticas (fig. 303).

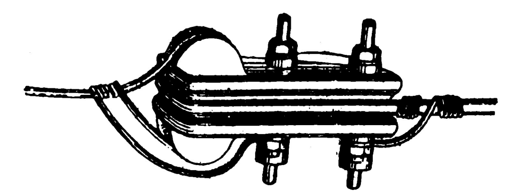


Fig. 302.

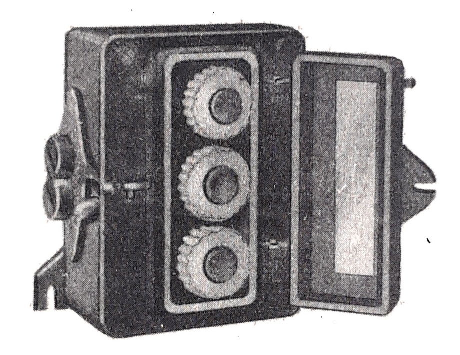


Fig. 303.

Cuadro. — La instalación se une a los cables de distribución de la red mediante un cuadro de distribución que contiene: un contador, un interruptor y cortacircuitos generales, y un interruptor y cortacircuitos sobre cada circuito derivado.

Contador [1]. — 1.° *La instalación está derivada sobre una red de corriente continua de dos hilos, o sobre una sola fase de una distribución de corriente*

[1] Para el estudio completo de los contadores véase el segundo tomo de esta obra: *Medidas eléctricas industriales*, y el libro de J. Doménech, *Contadores eléctricos de corriente alterna.*

continua de varios hilos, o sobre una red de corrientes alternas monofásicas, o sobre una sola fase de una red de corrientes alternas polifásicas. — Cualquiera que sea el tipo del contador empleado, siempre hay en él cuatro bornes, dos de los cuales comunican entre sí. Los conductores que llegan de los cables de distribución están conectados a dos de los bornes, frente a los cuales hay generalmente escrita la pala-

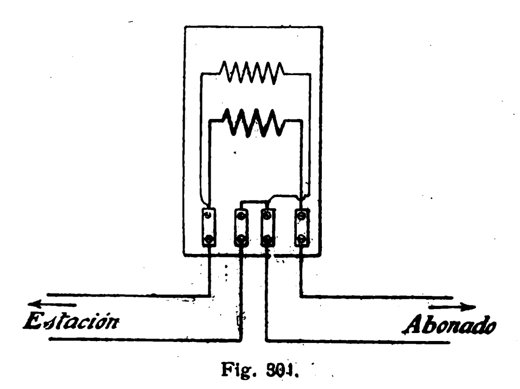


Fig. 304.

bra *estación,* o simplemente la letra *E*. Los otros dos, frente a los cuales se escribe la palabra *abonado,* o la letra *A*, comunican con los conductores que alimentan la instalación (fig. 304).

Entre los dos bornes que no se unen entre sí se encuentra el circuito de hilo grueso del contador; entre los dos bornes comunes y uno de los otros dos se encuentra el circuito de hilo fino, excepto en los contadores de cantidad que no tienen circuito de hilo fino.

2.° *La instalación está derivada sobre los dos puentes de una distribución con tres hilos.* — El contador tiene cuatro bornes y el montaje está representado en la figura 305. Ejemplo: contador Thomson (figura 306).

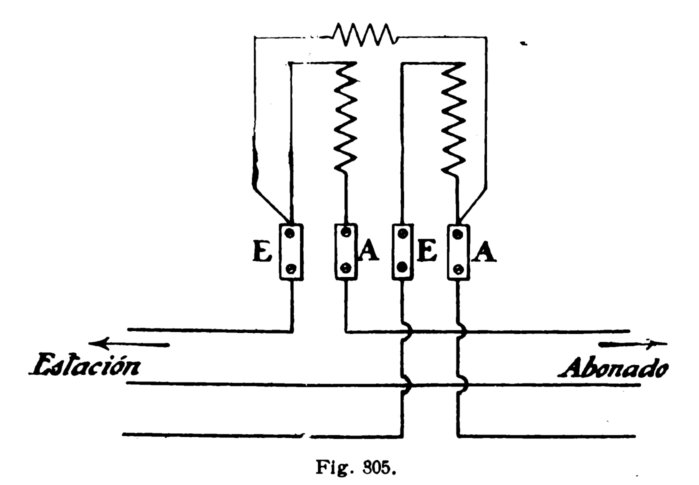


Fig. 305.

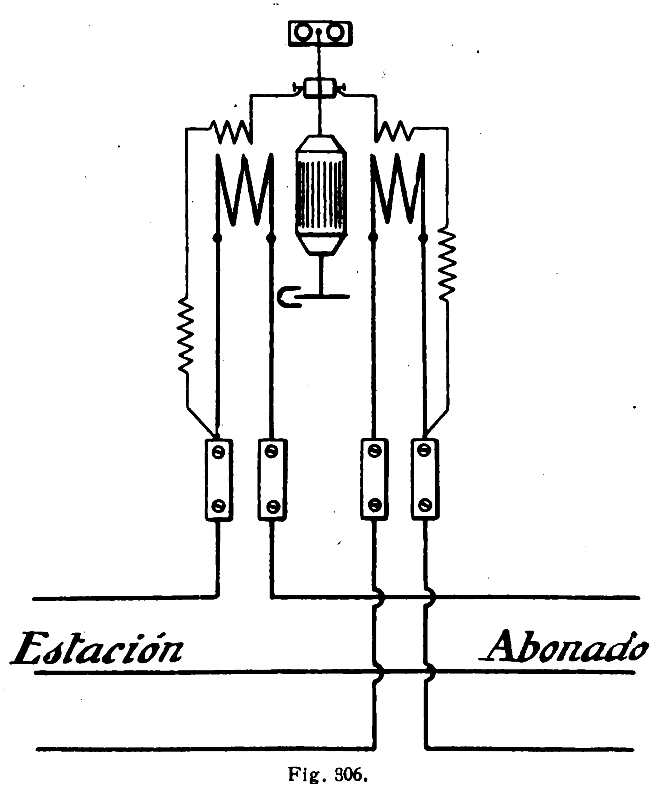


Fig. 306.

3.° *La instalación está derivada sobre las tres fases de una distribución trifásica con tres hilos.* — En el caso de una instalación de alumbrado, las tres fases no están siempre equilibradas, y el montaje es el indicado en la figura 307. El contador tiene cinco bor-

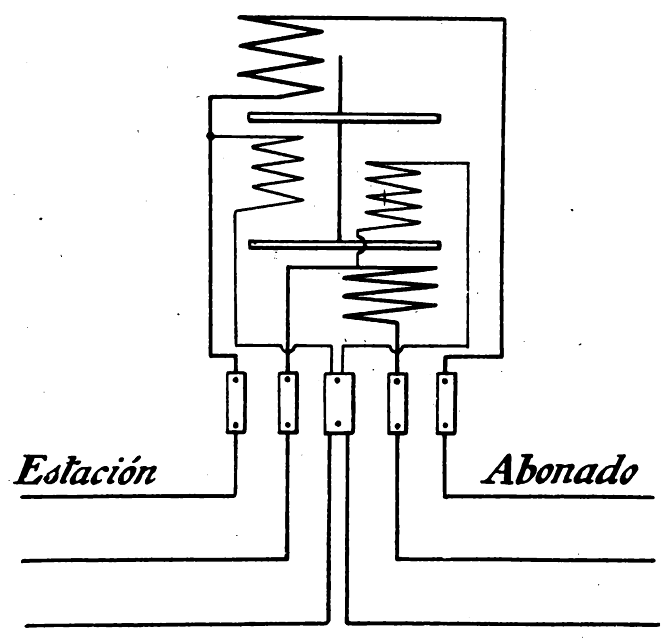


Fig. 307.

nes, uno de los cuales es común a las derivaciones, estación y abonado, y sirve de toma para los dos circuitos de hilo fino.

4.° *La instalación está derivada sobre las tres fases de una distribución trifásica con cuatro hilos.* — El contador tiene siete bornes y el montaje es el representado en la figura 308.

INTERRUPTORES Y CORTACIRCUITOS. — Los conductores llegan directamente al contador C; atraviesan un

interruptor general I, después los cortacircuitos generales CC. A partir de estos cortacircuitos, se dividen para alimentar los diferentes circuitos derivados, pasando por los interruptores I_1 I_2 y por los cortacircuitos C_1 C_1, C_2 C_2 que hay sobre cada circuito (fig. 309).

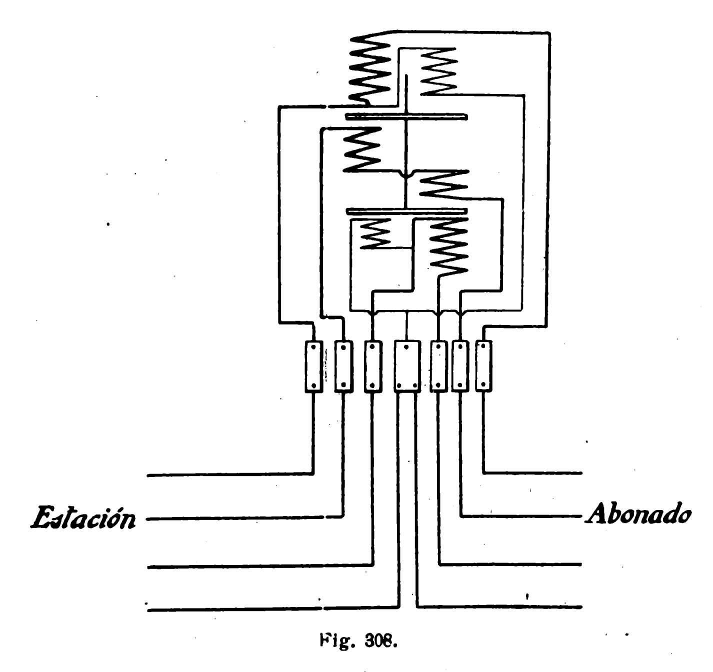


Fig. 308.

Se hacen llegar a veces los conductores directamente al interruptor y a los cortacircuitos antes que al contador; pero en este caso, estos aparatos están precintados de tal modo que es imposible tomar derivaciones entre sus bornes y por consiguiente utilizar una corriente que no pase por el contador.

Los diferentes órganos de los aparatos de maniobra, contactos, tomas de corriente, etc., deben montarse sobre soportes aislantes incombustibles. Si el cuadro

es de mármol, estos aparatos se montan directamente sobre el mismo; si es metálico, se montan sobre soportes aislantes, de porcelana o de mármol, fijándose estos zócalos sobre el cuadro.

Los cuadros de mármol tienen el inconveniente de que son pesados, frágiles y difíciles de perforar. Por

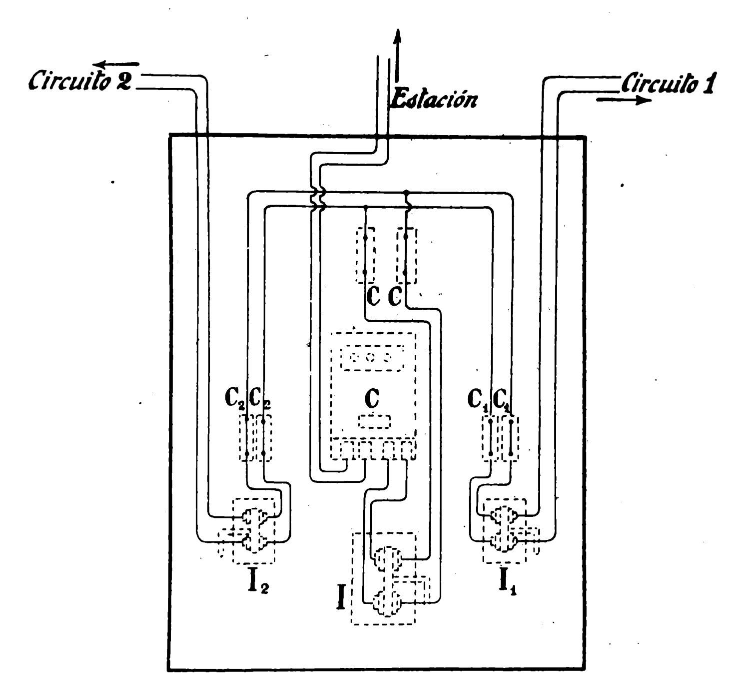


Fig. 309.

este motivo cada día se emplean más los cuadros de palastro embutido barnizado.

Con la intención de simplificarlos y normalizarlos, los principales constructores han creado cuadros formados por elementos simples yuxtapuestos que pueden ensamblarse para formar los conjuntos deseados.

Las figuras 310, 311 y 312 representan un cuadro con contador Thomson.

Es conveniente emplear interruptores multipolares de modo que se puedan separar de la red todos los conductores de la instalación; su ruptura debe ser bastante brusca para que no puedan establecerse arcos entre las partes fijas y las móviles.

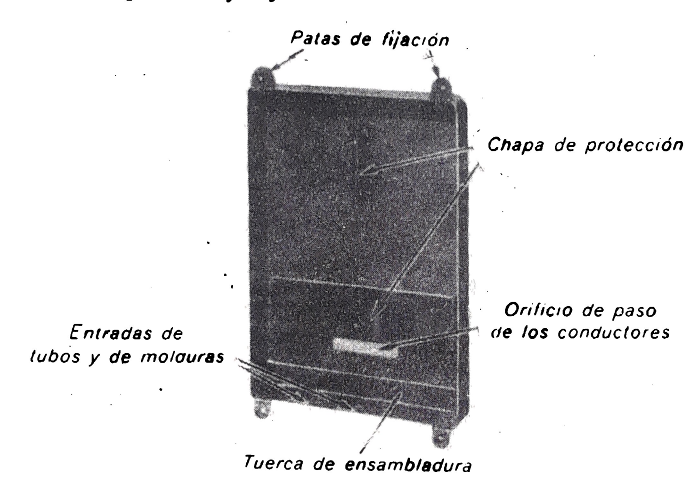


Fig. 310. — Elemento metálico para la fijación del contador, visto por detrás.

Hay muchos tipos de estos interruptores o conmutadores de palanca. Se prefieren los aparatos de construcción sólida y esmerada, en que los contactos entre las escobillas y las láminas móviles estén asegurados mediante una fuerte reacción elástica que debe persistir aun después de un uso continuado.

Se examinan las piezas que por su contacto establecen el paso de la corriente; estas piezas han de estar perfectamente pulimentadas de manera que presenten muy poca resistencia de contacto y no produzcan un recalentamiento perjudicial.

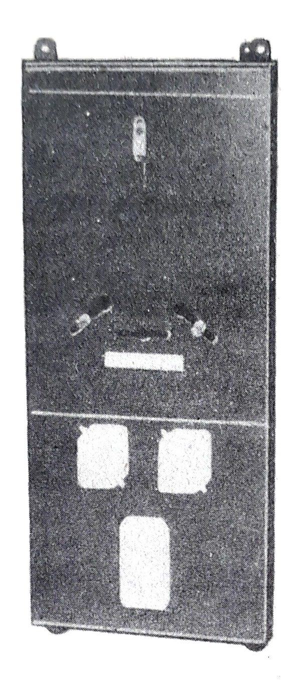


Fig. 311. — Cuadro de contador completo y desmontado.

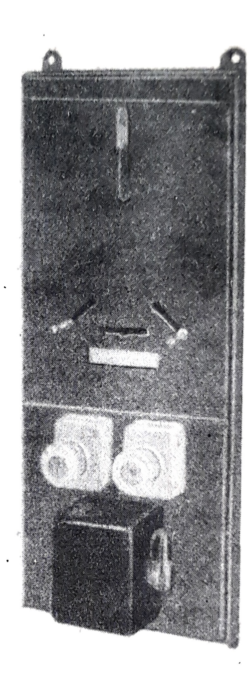


Fig. 312. — Cuadro de contador con su equipo.

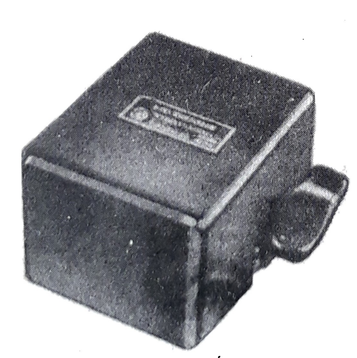


Fig. 313.
Interruptor para cuadro, vista exterior.

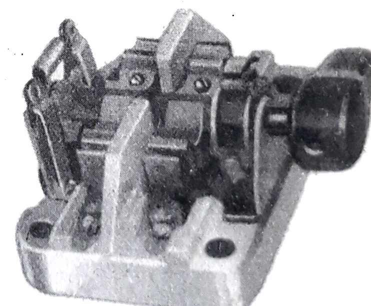


Fig. 314.
Interruptor para cuadro, visto interiormente.

Debe evitarse, tratándose de intensidades de corriente algo elevadas, el uso de aparatos en que los ejes de las partes móviles sirvan para el paso de la corriente.

Se emplean con mucha frecuencia en los cuadros, interruptores cubiertos con chapa de hierro embutida y barnizada (figs. 313 y 314).

Una vez elegido el tipo de aparato se determinan sus dimensiones por la intensidad de la corriente a que está destinado y por la tensión de la misma.

La sección de la lámina móvil debe ser tal, que la densidad de la corriente en el punto de contacto sea del orden de

2	amperes	por milímetro	cuadrado	para	el	cobre,
1	ampere	»	»	»	»	latón,
0,5	amperes	»	»	»	»	bronce.

En muchos aparatos la lámina es de latón y los contactos son de cobre.

Para las escobillas, la superficie debe ser del orden de 10 milímetros cuadrados por ampere cuando los contactos se establecen entre superficies planas (figura 315). Cuando las escobillas son haces de lámi-

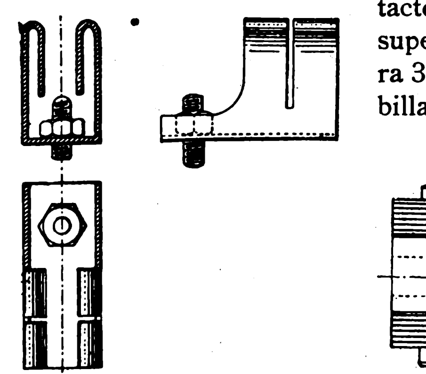


Fig. 315.

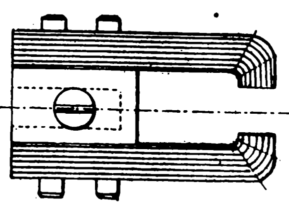


Fig. 316.

nas (fig. 316) (generalmente formadas por láminas de latón de 5 a 12 décimas de milímetro de espesor),

basta con 2 a 4 milímetros cuadrados por ampere.

Puede comprobarse que los contactos son suficientes y no dan lugar a calentamientos excesivos, midiendo en plena carga la caída de tensión entre la parte fija y la parte móvil; esta caída debe ser menor que $^2/_{100}$ de volt.

Los cortacircuitos de cuadro deben satisfacer a las condiciones exigidas por los reglamentos; además, deben estar provistos de un dispositivo para el precintado (figuras 317 y 318).

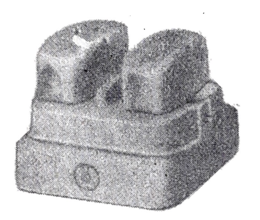


Fig. 317. - Cortacircuito para cuadro.

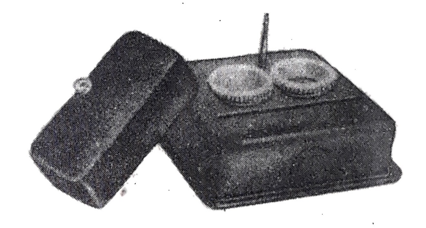


Fig. 318. Cortacircuito precintable.

Cuando del cuadro parte un gran número de circuitos se indica mediante inscripciones cuáles son los locales servidos por los diferentes aparatos.

Disyuntores. — Cada día se reemplaza más el conjunto interruptor-fusibles por un pequeño disyuntor. En efecto, los fusibles no están nunca calibrados con bastante precisión para funcionar correctamente como limitadores de la intensidad: no son otra cosa que órganos de protección contra los cortocircuitos. Además, el recambio de los cartuchos es causa de gastos y de pérdida de tiempo.

A continuación describimos el modelo de disyuntor construído por la «Société Als-Thom».

Una bilámina, recorrida por la corriente total, es deformada por el calor así que la intensidad deja de ser

normal y entonces empuja una paleta móvil, llamada «paleta grande», hacia adelante de los polos de una bobina asimismo recorrida por la corriente total.

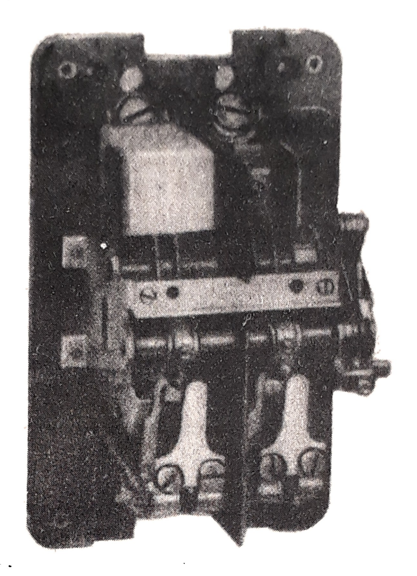


Fig. 319. — Disyuntor bipolar 10A, sin la tapa. Una de las cubiertas de protección y de soplado ha sido suprimida en el grabado.

Esta bobina sirve al mismo tiempo de bobina de extinción y de bobina de atracción.

La paleta grande, cuando está suficientemente atraída, dispara los órganos que producen el desengatillamiento.

Una paleta más pequeña, llamada instantánea, que produce el mismo efecto al experimentar el más pequeño desplazamiento, está colocada cerca de los polos

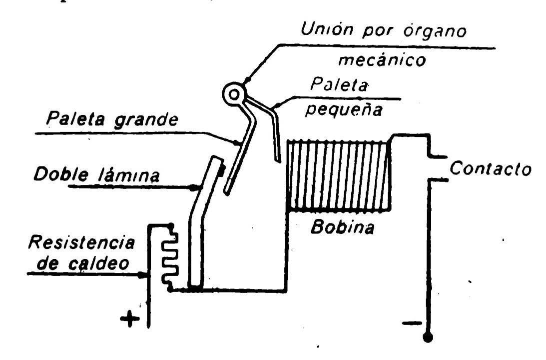


Fig. 320.
Representación esquemática de los órganos correspondientes a un polo.

de la bobina y en caso de fuerte sobrecarga o de corto-circuito actúa instantáneamente produciendo el desengatillamiento en un tiempo brevísimo.

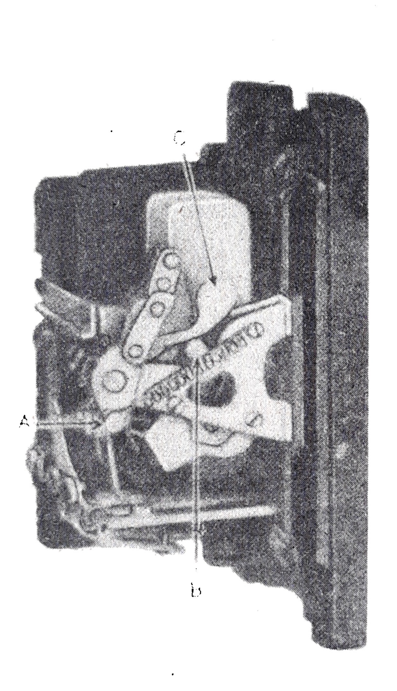


Fig. 321.
Mecanismo de desengatillado.

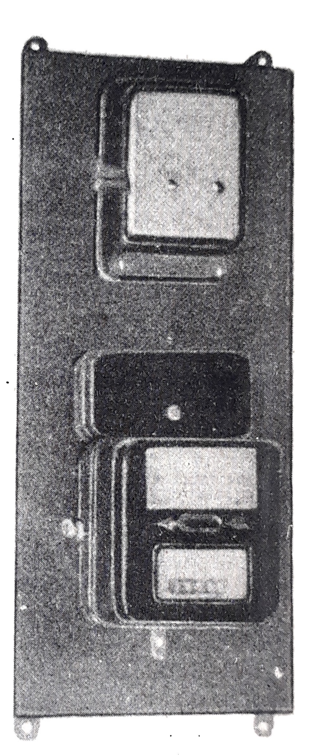


Fig. 322. — Cuadro de abonado con disyuntor ALS-THOM.

En su conjunto la disposición está compuesta, pues, de:

1.° Un interruptor mecánico independiente, que puede maniobrarse fácilmente a mano, por intermedio de una empuñadura aislante que se utiliza asimismo para rearmar el mecanismo después del desengatillamiento.

La ruptura es brusca con extinción magnética de la chispa.

2.° Una bilámina térmica cuya acción diferida permite cortar el circuito en caso de sobrecarga débil pero de cierta duración.

3.° Un dispositivo electromagnético que produce la apertura instantánea del interruptor en caso de cortocircuito o de gran sobrecarga.

Cada polo del disyuntor lleva una bilámina, una bobina y dos paletas.

Las paletas instantáneas están fijas sobre el mismo eje y son mutuamente solidarias; en cambio, las paletas grandes son independientes y cada una de ellas gobierna el mecanismo de desengatillamiento.

Este mecanismo está compuesto en principio por un brazo móvil que se arma por la acción de la manecilla cerrando los contactos para poner en servicio el aparato.

Maniobrando a la inversa la manecilla, quedan libres los resortes de los contactos, cuya separación produce la brusca ruptura del circuito. Del mismo modo, las paletas rompen dicho circuito al actuar en el punto *B*.

La leva *C* impide el engatillamiento mientras una de las paletas esté aún atraída, es decir, mientras subsistan el cortocircuito o la sobretensión que han provocado el desengatillamiento.

Fijación de los aparatos en las paredes. — Los aparatos: interruptores, cortacircuitos, timbres, etc., se fijan en las paredes por medio de tornillos, clavos o ganchos. Se empieza por practicar en la pared un agujero de dimensiones convenientes en el que se introduce una clavija de madera o tapón de longitud igual a la profundidad del agujero, y de diámetro algo mayor que el de éste. En dicho tapón se introduce el tornillo o el clavo.

El procedimiento para practicar agujeros en la pared

depende de los materiales de que esté construída. Si está hecha de ladrillos huecos, se emplea un berbiquí con una barrena muy afilada y con la hélice muy marcada. En el caso de que el tapón haya de ser de pequeña sección (interruptor de porcelana), se emplea con frecuencia una punta cuadrada.

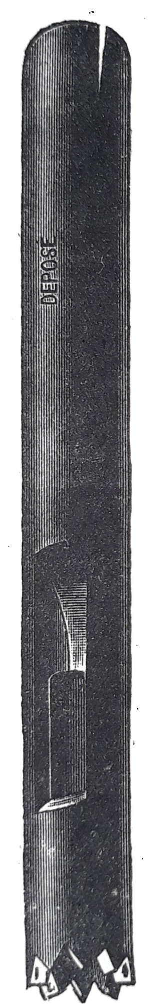


Fig. 323.

Golpeando ligeramente y haciendo girar el berbiquí, se atraviesa la primera pared del ladrillo; después se hace una pequeña abertura en la segunda pared; entonces se coloca un tapón de punta muy cónica, cuya longitud sea un poco mayor que el espesor del ladrillo. Si el muro está hecho de ladrillos macizos o de piedra, se emplea un cincel de poca sección o un botador (figura 323).

Se gira el instrumento un cierto ángulo a cada martillazo, de manera que caigan las partículas de polvo que se producen y que resulte un agujero cilíndrico.

Los tapones son de madera blanda para que puedan aplastarse en el agujero y quedar así bien sujetos; por esta misma razón no tienen forma cilíndrica, sino más bien cuadrangular o poligonal y ligeramente cónica en su extremo, para facilitar su introducción.

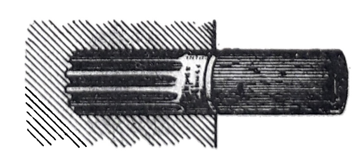


Fig. 324.

También se emplean tapones extensibles formados de dos partes, cuyo empleo se comprende perfectamente viendo la figura 324.

Atravesar una pared. — Cuando una canalización ha de atravesar una pared, se perfora esta pared con un

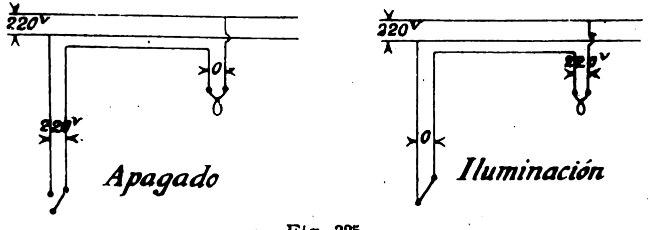


Fig. 325.

berbiquí, o con un cincel, y se introduce en el agujero que resulta uno o varios tubos Bergmann. Es muy conveniente no pasar por un mismo tubo dos hilos de distinta polaridad, pues hay que tener en cuenta que entre los conductores que llegan a un interruptor correspondiente a una o a varias lámparas, la tensión cuando las lámparas están apagadas es igual a la tensión bajo la cual funciona la instalación (fig. 325). Lo mismo sucede para los dos conductores que alimentan una lámpara, cuando ésta arde. Por consiguiente, si la tensión y las condiciones de aislamiento exigen que los conductores no deban estar en contacto, será preciso pasarlos por tubos diferentes.

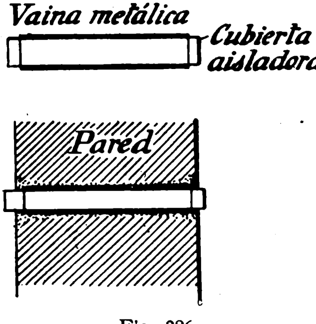


Fig. 326.

La armadura de los tubos, cobre o palastro emplo-

mado, ha de estar levantada en $^1/_2$ ó 1 centímetro por cada extremo, y estos dos extremos deben salir de la pared en una pequeña longitud (fig. 326).

Atravesar un techo.—Los conductores, al atravesar los techos deben estar protegidos por tubos aislados

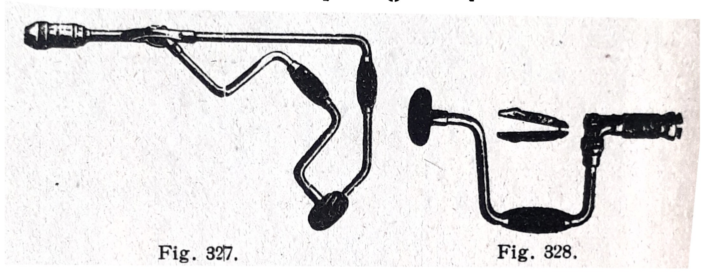
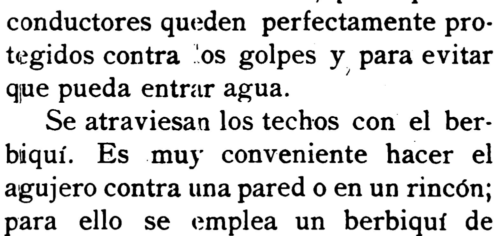


Fig. 327. Fig. 328.

interiormente y recubiertos exteriormente por una vaina metálica. Estos tubos deben salir del techo por



lo menos 15 centímetros, para que los conductores queden perfectamente protegidos contra los golpes y para evitar que pueda entrar agua.

Se atraviesan los techos con el berbiquí. Es muy conveniente hacer el agujero contra una pared o en un rincón; para ello se emplea un berbiquí de ángulo (fig. 327) o en trinquete (figura 328).

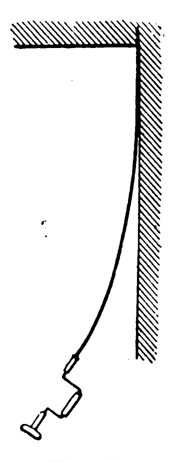


Fig. 329.

Ordinariamente es más cómodo utilizar el berbiquí corriente y proceder de la siguiente manera: se fija una barrena en el extremo de una larga varilla de acero dulce, se marca el agujero en el techo, después se fija la varilla en el berbiquí y se continúa el agujero marcado, desde abajo, con toda comodidad (fig. 329).

Ejemplo de una instalación de alumbrado en una vivienda. — En la figura 330 está representado el plano de la vivienda. La altura general de los cielorrasos es de 3,50 metros y se suponen de color blanco mate uniforme.

I. *Intensidades luminosas, número de lámparas.* a) *Salón.* — Superficie 5,80 × 3,50 = 19,6 m².

Color de las paredes: verde bastante oscuro.

De conformidad con la tabla de la página 130, adoptaremos una iluminación de 30 lux.

Como que se trata de una instalación relativamente lujosa, no vacilamos en elegir la iluminación indirecta.

La tabla de la página 131 nos indica entonces una potencia eléctrica de 16,5 watts por metro cuadrado (paredes oscuras y cielorraso claro).

Por consiguiente, la potencia total necesaria será de 16,5 × 19,6 = 323 watts. Tomando trece lámparas de 25 watts dispuestas en reflectores disimulados en las molduras del cielorraso, tendremos una potencia de 13 × 25 = 325 watts.

Esta disposición será poco económica, pero dará una luz suave y bien difusa.

b) *Comedor.* — Superficie 4,80 × 3,50 = 16,8 m², empapelado de gris claro. Adoptaremos la iluminación directa, pero colocando las lámparas dentro de recipientes de vidrio difusor muy denso. Será preciso entonces prever una potencia algo mayor, y así adoptaremos 12 watts/m², o sea, en total, 12 × 16,8 = 202 watts.

Una araña central de vidrio difusor contendrá cuatro lámparas de 25 watts. La iluminación restante será proporcionada por cuatro anexos rectilíneos horizontales deslustrados que contengan lámparas-tubo de 25 watts. De esta manera obtendremos una potencia total de 200 watts.

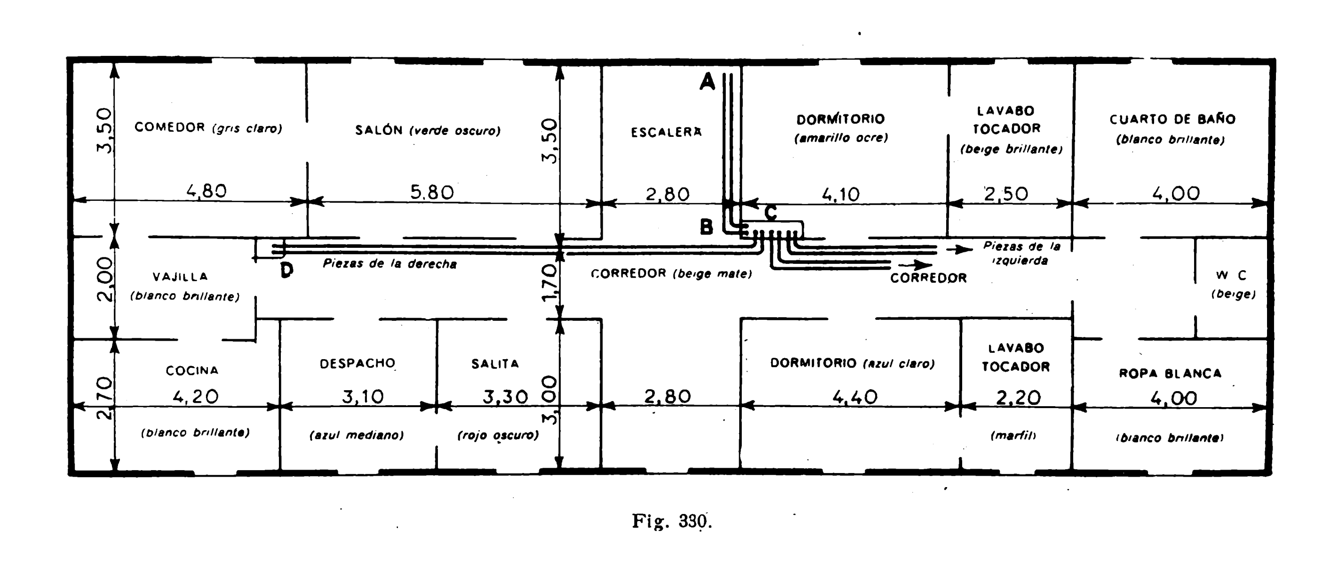

A
B
C
D
COMEDOR (gris claro)
SALÓN (verde oscuro)
ESCALERA
DORMITORIO (amarillo ocre)
LAVABO TOCADOR (beige brillante)
CUARTO DE BAÑO (blanco brillante)
VAJILLA (blanco brillante)
Piezas de la derecha
CORREDOR (beige mate)
CORREDOR
Piezas de la izquierda
W C (beige)
COCINA (blanco brillante)
DESPACHO (azul mediano)
SALITA (rojo oscuro)
DORMITORIO (azul claro)
LAVABO TOCADOR (marfil)
ROPA BLANCA (blanco brillante)
3,50
4,80
5.80
3,50
2,80
4,10
2,50
4,00
2,00
1,70
2,70
4,20
3,10
3,30
3,00
2,80
4,40
2,20
4,00

Fig. 330.

Un interruptor independiente servirá para encender y apagar el grupo complementario.

c) *Despacho*. — 3,10 × 3 = 9,30 m², papel azul bastante claro, iluminación 50 lux, indirecta: 15 × $\times \frac{50}{30}$ = 25 watts/m², 25 × 9,30 = 231 watts.

Se empleará una canal difusora que contenga diez lámparas-tubo de 25 watts.

d) *Salita*. — 3 × 3,30 = 9,90 m², 30 lux, colores oscuros, iluminación indirecta de 16,5 watts/m², o sea 16,5 × 9,90 = 163 watts.

Iluminación por rayos proyectados al nivel de la superficie del cielorraso por dos difusores de 100 watts, lo que dará aproximadamente 20 watts/m², o sea una iluminación de $30 \times \frac{20}{16,5} = 36$ lux.

e) *Dormitorios*. — 14,35 m² para el uno y 13,20 para el otro, colores claros, iluminación semiindirecta de 12 watts/m², o sea, aproximadamente, 168 watts.

Iluminación por plafón de plato, de vidrio deslustrado, que lleve tres lámparas de 40 watts.

Una lámpara portátil de 40 watts junto a la cama.

f) *Lavabos-tocador*. — Superficies 8,75 y 7,5 m², iluminación de 40 lux, paredes muy claras, iluminación semidirecta: $9 \times \frac{40}{30} = 12$ watts/m², o sea, respectivamente, 105 y 90 watts.

Iluminación por anexos difusores a cada lado del espejo que contengan cada uno de ellos una lámpara-tubo de 60 watts.

g) *Cuarto de baño*. — Superficie 14 m², iluminación 40 lux, semidirecta: $12 \times \frac{40}{30} = 16$ watts/m², o sea 224 watts.

Un plafón rectangular difusor que lleve una lámpara

de 150 watts. Dos anexos de 40 watts que suministren la iluminación restante.

Se procurará que los interruptores no sean accesibles desde el baño. En efecto, su aislamiento puede ser defectuoso y sería entonces peligroso tocarlos estando sumergido en el agua, ya que la resistencia del cuerpo es entonces mucho menor y podrían producirse accidentes mortales.

h) *Cuarto de costura y plancha.* — Superficie $4{,}00 \times 2{,}70 = 10{,}8$ m², paredes muy blancas, iluminación de 80 lux, semidirecta: $9 \times \frac{80}{30}$ watts/m², o sea, en total, 260 watts.

En este sitio es especialmente indicado el empleo de una lámpara «luz diurna» porque permite descubrir las manchas amarillas de herrumbre o de quemaduras sobre el lienzo blanco. Como las paredes azuladas de estas lámparas absorben una cierta parte del flujo luminoso, será preciso tomar una lámpara más potente. Adoptaremos, pues, una lámpara de 300 watts.

i) *Water-closets.* — Iluminación semidirecta. Un difusor provisto de una lámpara de 25 ó 40 watts.

j) *Cocina.* — Superficie 11,3 m², iluminación semiindirecta de 40 lux, 16 watts/m², o sea, en total, 180 watts. Un difusor central equipado de una lámpara de 100 watts. El complemento de iluminación será proporcionado por dos anexos de porcelana colocados encima de la fregadera y de los fogones, de 40 watts cada uno de ellos. Estos anexos podrán encenderse por separado. El aislamiento deberá ser muy cuidadoso a causa de la humedad que pueda reinar en el local (vapor de agua, lavado, etc.).

k) *Vajilla.* — 8 m², 128 watts. Disposición análoga a la de la cocina: un difusor de 100 watts y un anexo de 25 watts que pueda encenderse independientemente.

l) *Corredor y recibimiento.* — Pueden considerarse como compuestos de dos piezas de $6{,}60 \times 1{,}60 = 10$ m² y dos de $4{,}10 \times 2{,}80 = 11{,}5$ m², iluminación semidirecta, paredes oscuras, 12 watts/m², o sea, respectivamente, 120 y 140 watts. Se tomarán lámparas de 100 y 150 watts en difusores opalinos. El encendido deberá poder hacerse desde la escalera, desde un extremo del corredor o desde el otro extremo del mismo.

La potencia total es, pues, 3100 watts.

Además colocaremos en cada pieza dos tomas de corriente destinadas al funcionamiento de los aparatos domésticos.

He aquí, a título de información, la potencia necesaria para el funcionamiento de diversos aparatos caseros.

APARATO	POTENCIA
Nevera	300 a 500
Aspirador de polvo . .	150 » 500
Hervidor	200 » 750
Tenacillas para rizar .	50 » 150
Radiador parabólico . . .	300 » 1000
Plancha eléctrica	250 » 600
Ventilador	30 » 150
Tostador de pan.	300 » 600
Calientaplatos	50 » 150
Aparato de radio	30 » 80

Supondremos, no obstante, que la calefacción y el cocinado no se hacen con electricidad. De lo contrario es claro que habría que prever dos circuitos independientes con su correspondiente contador, uno para la luz y el otro para los demás usos.

Si queremos reservarnos la posibilidad de poder

hacer funcionar a la vez y al mismo tiempo que la red de alumbrado: una plancha, un aspirador, un radiador, un aparato de radio, un ventilador y un «frigidaire», deberemos prever una potencia suplementaria de 1300 watts.

Por consiguiente, la potencia total que hay que instalar es de $3100 + 1300 = 4400$ watts, correspondientes a una intensidad de $\frac{4400}{110} = 40$ amperes.

Estos valores pueden parecer grandes, pero es preciso no olvidar que hemos considerado una instalación de lujo en la que hemos recurrido en gran escala a la costosa iluminación indirecta. Pero aunque toda esta potencia no haya de ser consumida es preferible prever con creces las canalizaciones, puesto que en el porvenir las aplicaciones domésticas de la electricidad no harán sino aumentar.

II. *División de los circuitos; diámetro de los conductores.* — El ramal que alimenta la instalación parte de una columna que sube pasando por la caja de la escalera (fig. 330). Llega, bajo tubo, a un cuadro de distribución disimulado en una placa empotrada que lleva: un interruptor y dos cortacircuitos generales, un contador, un interruptor bipolar y dos cortacircuitos para las piezas situadas a la derecha de la escalera: salón, comedor, cocina, despensa y despacho; un interruptor bipolar y dos cortacircuitos para las piezas de la izquierda: dormitorios, cuarto de baño, water-closets y cuarto de costura y plancha; y, por último, dos cortacircuitos de los que parten los conductores que alimentan las lámparas del corredor.

Dos conductores *CD* alimentan el conjunto de las piezas de la derecha y todas las derivaciones parten del mismo punto *D*, donde han sido reunidos sobre un cuadro metálico los cortacircuitos que las protegen.

Calculemos los diámetros necesarios para los conductores de las diversas secciones.

1.° *Parte AB.* — Es recorrida por la corriente total de 40 amperes. Según la tabla de la página 138, la densidad de corriente que ha de admitirse es de 4 amp/mm², lo que exige una sección de $\frac{40}{4} = 10$ mm². Tomaremos un cable formado de siete hilos de $^{14}/_{10}$ mm. de diámetro, cuya sección total sea de 10,77 mm² y tenga una resistencia kilométrica de 1,57 ohms.

La longitud de los conductores será de

$$2 \times 3\,50 = 7 \text{ metros;}$$

su resistencia será de

$$\frac{1{,}57}{1\,000} = 7 \text{ ohms,}$$

y como que son recorridos por 40 amperes, la caída de tensión será de

$$\frac{1{,}57}{1\,000} \times 7 \times 40 = 0{,}44 \text{ volts.}$$

2.° *Parte CD.* — Debe poder alimentar:

El salón		325	watts
El comedor	iluminación	200	»
	aspirador	200	»
La cocina		180	»
El cuarto de vajilla	iluminación	125	»
	frigidaire	300	»
El despacho	iluminación	250	»
	radiador	400	»
La salita	iluminación	200	»
	radio	50	»
O sea, en total		2230	watts

correspondientes a una corriente de $\frac{2230}{110} = 20$ amperes aproximadamente.

Con una densidad de 5 amp/mm² se obtiene una sección de $\frac{20}{5} = 4$ mm², correspondiente a un cable de siete hilos de $^{9}/_{10}$, sección 4,45 mm², resistencia kilométrica 3,82 ohms.

La longitud del trayecto de estos conductores es de

$$1,50 + 2,80 + 5,80 = 10,10 \text{ metros}$$

(siendo de 1,50 metros la altura sobre el cuadro), y, por tanto, la longitud total de los conductores será de 20,20 metros, que tendrán una resistencia de

$$\frac{3,82}{1000} \times 20,20 \text{ ohms}$$

y una caída de tensión de

$$\frac{3,82}{1000} \times 20,20 \times 20 = 1,55 \text{ volts}$$

Esta caída de tensión es algo excesiva, puesto que si queremos admitir una caída de 1,50 $^{\circ}/_{\circ}$ en los cortacircuitos de donde parten las lámparas, de *A* a *D* se producirá una caída de 1,65 volts, y con los conductores elegidos tendremos en total una caída de tensión de

$$1,55 + 0,44 = 1,99 \text{ volts.}$$

Nos vemos, pues, conducidos a tomar para el trayecto *CD* cable de siete hilos de $^{12}/_{10}$, sección 7,91 mm², resistencia 2,14 ohms/km.

3.° *Otros ramales.* — Las secciones de los conductores de las distintas partes de los demás circuitos se calcularán como acaba de decirse, teniendo en cuenta los aparatos domésticos que son susceptibles de ser empalmados a los mismos.

El proyecto deberá completarse con el cálculo del número y las dimensiones de las molduras o los tubos que deberán fijarse a las paredes.

CAPÍTULO VII

Electromotores de corriente continua

Un motor de corriente continua está construído del mismo modo que un generador; cuando se aplica una diferencia de potencial conveniente entre sus bornes, toma un movimiento de rotación cuyo sentido depende de los sentidos de las corrientes en el inducido y en el inductor. Para cambiar el sentido de rotación, basta cambiar el sentido de la corriente en el inducido, o en el inductor.

Intensidad de la corriente en el inducido. — Está dada por la relación (véase tomo I):

$$I = \frac{U - E}{r},$$

en que U es la tensión aplicada entre las escobillas, r la resistencia del inducido y E la fuerza electromotriz desarrollada en el inducido por su rotación en el campo inductor.

Cuando el motor no gira, es decir, al arrancar, $E = 0$ e $I = \frac{U}{r}$.

Ahora bien, r es muy pequeña, luego la corriente al arrancar es demasiado alta y por consiguiente peligrosa para los conductores y para el circuito del inducido. Por lo tanto, es necesario proteger el motor contra la corriente peligrosa de arranque; para conseguirlo se pone en serie con el inducido una resistencia de protección que se va suprimiendo poco a poco a medida que el motor al ir girando va desarrollando una fuerza contraelectromotriz suficiente. Esta resistencia variable de protección se llama *reostato de arranque*.

Velocidad. — Tiene por valor:

$$N = \frac{(U - rI)\,10^8}{n\,\Phi} \text{ vueltas por segundo,}$$

siendo Φ el flujo útil emitido por polo.

Se sabe que Φ tiene por valor:

$$\Phi = \frac{1{,}25\,mi}{\mathcal{R}}; \quad \text{por consiguiente,} \quad N = \frac{(U - rI)\,\mathcal{R} \times 10^8}{1{,}25\,mni};$$

siendo m el número de espiras inductoras, i la corriente inductora y $\mathcal{R}$ la reluctancia del circuito magnético de la máquina.

De estas relaciones se deduce que se puede modificar la velocidad de un motor, haciendo variar uno de los factores siguientes:

- U, diferencia de potencial entre las escobillas;
- i, corriente en el inductor;
- n, número de espiras inducidas;
- m, número de espiras inductoras;
- $\mathcal{R}$, reluctancia del circuito magnético.

Se ve fácilmente que se *aumentará* la velocidad, *aumentando* U o $\mathcal{R}$ o *disminuyendo* n, m o i, y al contrario.

Par motor. — Tiene por valor:

$$C = \frac{n \Phi I}{2 \pi \times 10^8} \text{ joules};$$

es decir, que es proporcional al número de espiras inducidas, al flujo inductor y a la corriente en el inducido.

Potencia. — Tiene por valor:

$$U \times I \text{ watts};$$

también es igual al producto del número que mide el par por el número que mide la velocidad.

Elección de motor. — Se hace esta elección teniendo en cuenta:

1.° La clase de trabajo mecánico que ha de producir, lo cual fija su tipo, definido por su modo de excitación;

2.° La potencia máxima que debe desarrollar y sus condiciones particulares de funcionamiento, lo cual fija sus dimensiones.

Tipo. — Si el par que debe desarrollar no experimenta importantes y bruscas variaciones durante el funcionamiento, se emplea un motor de *característica shunt*.

Por el contrario, si debe sufrir frecuentes y considerables variaciones y si no hay que temer velocidades excesivas, se emplean motores de *característica serie*.

Dimensiones. — Un motor se construye con sus dimensiones calculadas según determinadas condicio-

nes de funcionamiento: tensión aplicada, potencia, velocidad; sin embargo, puede funcionar en condiciones diferentes, pero entonces no marcha tan bien desde el punto de vista del rendimiento y de la conmutación. Se deben por consiguiente tener en cuenta, en los cálculos, las variaciones que pueden sufrir las condiciones normales de funcionamiento, por ejemplo, el aumento de velocidad. El motor se calcula de esta manera para las condiciones más desfavorables, obteniéndose dimensiones tanto más grandes para una potencia normal dada, cuanto mayores hayan sido los excesos considerados sobre las condiciones normales. Por consiguiente, es muy importante, al adquirir un motor, dar al constructor, no solamente la tensión, la potencia y la velocidad, sino también las variaciones que puedan o deban sufrir estas magnitudes.

I. Motores shunt

a) **El motor puede, sin inconveniente, sufrir algunas variaciones de velocidad con la carga, y no es útil tener varios regímenes de velocidad.** — Se emplea un motor shunt sin regulador de inducción. Esta disposición únicamente se utiliza para motores de pequeña potencia que accionan máquinas-herramienta (taladradoras, etc.); no siendo necesario el regulador de inducción, se suprime por razones económicas.

Es conveniente que el circuito magnético del motor se sature para la tensión aplicada, para que las variaciones de resistencia (con la temperatura) del circuito de excitación y la reacción del inducido influyan poco en la velocidad.

El montaje está dado por el esquema de la figura 331.

Para no cometer errores en el montaje, se sigue el orden siguiente:

1.° Unir uno de los bornes *a* del inducido con un borne *c* del circuito inductor, y este punto común, a uno de los hilos de línea que llevan la corriente;

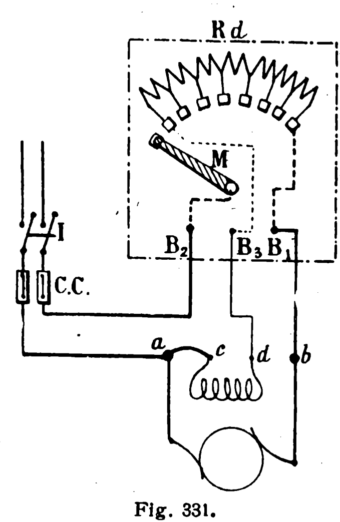


Fig. 331.

2.° Unir el segundo borne *b* del inducido al borne B_1 del reostato de arranque R_d conectado al contacto de cortocircuito;

3.° Unir el segundo hilo de línea al borne B_2 del reostato de arranque que comunica con la manivela *M*;

4.° Unir el segundo borne *d* del circuito de excitación al borne B_3 del reostato, que está conectado al primer contacto (resistencia máxima).

Observación I. — Para que las resistencias del

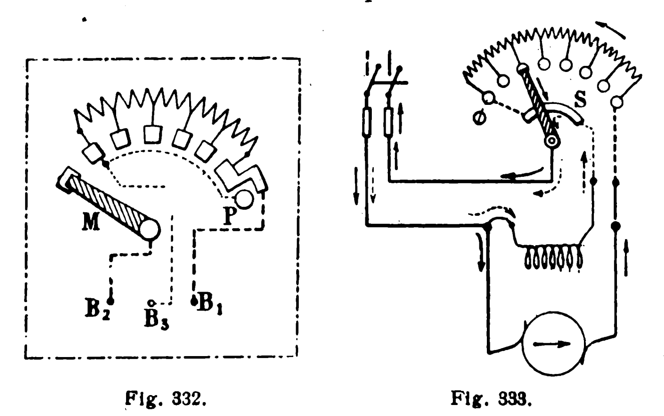


Fig. 332. Fig. 333.

reostato de campo no queden en serie con la excitación durante la marcha, se pone en cortocircuito

mediante el contacto P, sobre el cual se apoya la manivela del reostato cuando se suprimen todas las resistencias (fig. 332). También puede adoptarse la disposición indicada en la figura 333: la manivela se apoya constantemente sobre el sector S y el circuito inductor se conecta a este sector, de manera que la corriente de excitación pasa directamente a los inductores.

Observación II. — Es muy importante tomar precauciones para prevenir toda ruptura del circuito inductor; especialmente hay que efectuar cuidadosamente las conexiones que unen los bornes del circuito inductor a los del inducido y del reostato.

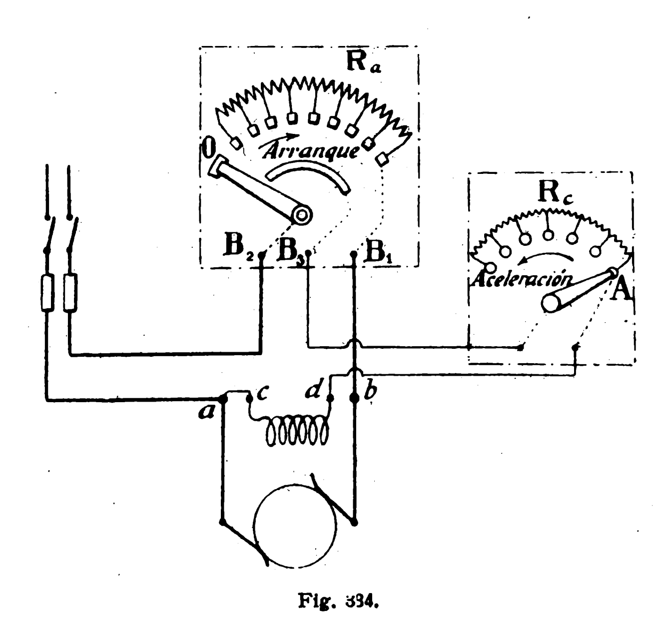


Fig. 334.

b) La carga sufre variaciones que no exceden del 25 °/o y la velocidad debe poderse mantener constante.

c) **La velocidad ha de poder sufrir variaciones cuyo valor máximo no exceda del valor de la relación de 1 a 1,25.** — En estos dos casos, se emplea un motor shunt y se regula la velocidad por la corriente de excitación. Se monta en serie con el circuito inductor un *regulador de inducción* o *acelerador*.

El montaje está dado por el esquema de la figura 334. Se procede como ya se ha indicado, pero intercalando el regulador de inducción R_c en el circuito que une el borne *d* del circuito inductor con el borne B_3 del reostato de arranque.

Cuando el motor está parado, la manivela del reostato de arranque está sobre el contacto muerto *O*, y la del regulador de inducción sobre su contacto de cortocircuito *A*. Se empieza por suprimir poco a poco todas las resistencias del reostato de arranque y se aumenta progresivamente, si es necesario, la velocidad del motor, agregando resistencias en el regulador de inducción, lo cual hace disminuir la corriente de excitación y por consiguiente el flujo Φ, aumentando por lo tanto la velocidad. Ordinariamente se reúnen los dos reostatos en un solo aparato, llamado *arranque con acelerador* (fig. 335).

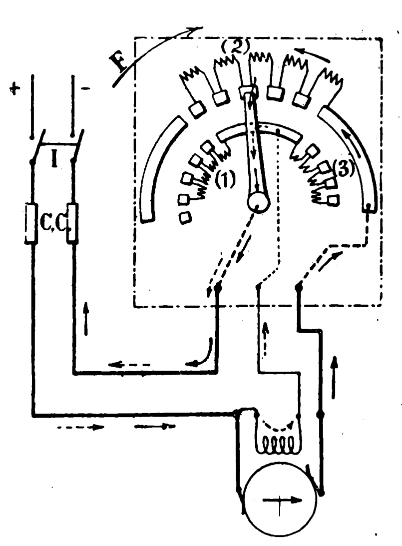


Fig. 335.

Moviéndose la manivela en el sentido de la flecha *F*, se va estableciendo la corriente en el inductor por las

resistencias (1), después pasa la corriente máxima por el circuito de excitación, y se establece progresivamente en el inducido por la resistencia de arranque (2). Por último, cuando la manivela llega a los contactos (3), la corriente pasa al inductor por medio de las resistencias correspondientes, de modo que puede aumentarse poco a poco la velocidad.

La importancia de las resistencias (1) estriba principalmente en la disminución progresiva de la corriente inductora al parar, lo cual reduce la chispa de ruptura.

Observación I. — Para que las variaciones de la corriente de excitación produzcan variaciones sensibles del flujo y por consiguiente de la velocidad, es preciso que el circuito magnético no se sature por la corriente máxima de excitación.

Observación II. — Cuando se tiene una máquina con una buena conmutación, se puede alcanzar una aceleración del 30 % de la velocidad normal, mediante el regulador de inducción. Pero en general esta aceleración es un límite.

Dispositivos empleados para proteger un motor contra los accidentes que puedan ocurrir durante su funcionamiento. — 1.° *Ruptura de la corriente de excitación.* — Se sabe que en este caso el motor tiende a tomar una velocidad considerable, al mismo tiempo que disminuye el par motor; por consiguiente, si el par resistente es pequeño, el motor se dispara; si el par resistente se opone al aumento de velocidad, el motor se para, y la corriente en el inducido se eleva mucho, siendo peligrosa. Para proteger el motor en ambos casos, se emplea un reostato de arranque, cuya manivela es solicitada hacia su contacto muerto por un muelle. Se mantiene sobre el último contacto del reostato de arranque por la atracción que ejerce sobre ella un electroimán E recorrido por la corriente de

excitación (fig. 336). Si se corta la corriente de excita-

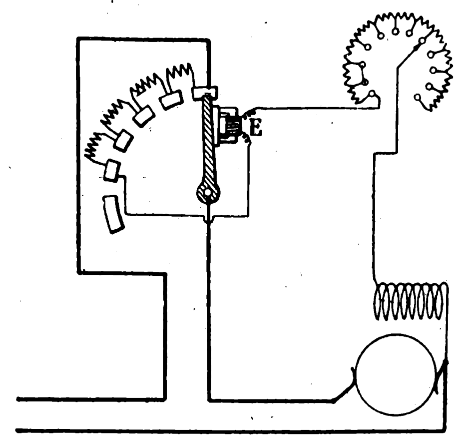


Fig. 336.

cion, cesa la atracción, la manivela vuelve sobre su contacto muerto y el motor se para.

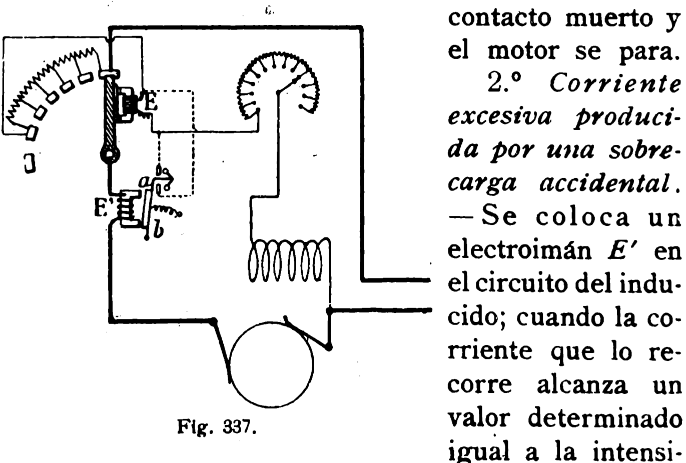


Fig. 337.

2.° *Corriente excesiva producida por una sobrecarga accidental.* — Se coloca un electroimán *E'* en el circuito del inducido; cuando la corriente que lo recorre alcanza un valor determinado igual a la intensidad máxima que puede soportar el motor, la pieza de hierro dulce *ab* es atraída (fig. 337). El circuito del electroimán *E* se pone en cortocircuito y no es

recorrido por corriente alguna; la atracción sobre la manivela cesa, volviendo ésta a su contacto muerto, y parándose el motor.

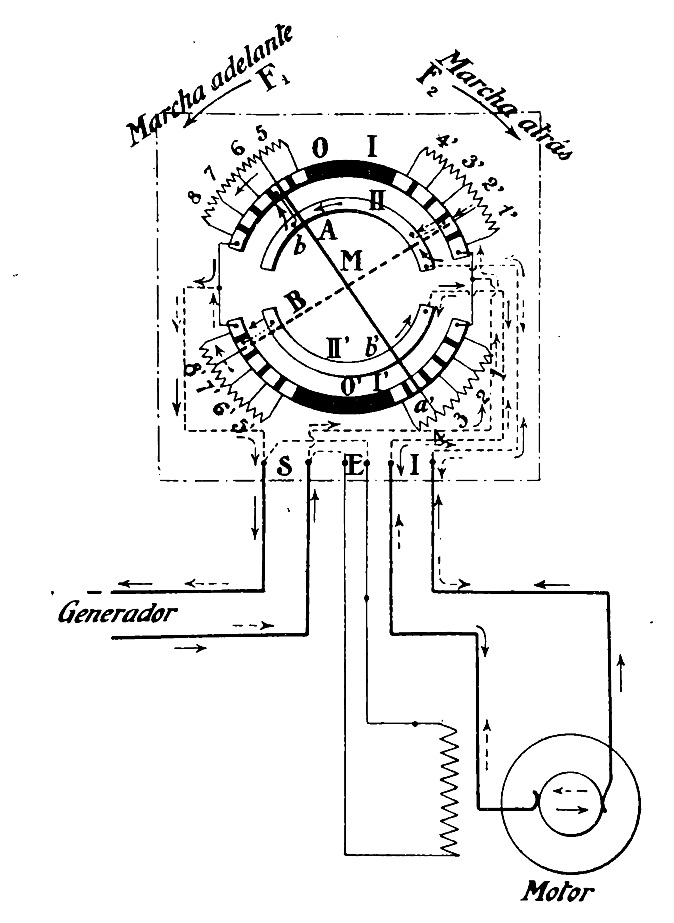


Fig. 338.

Cambio de sentido de rotación. — Hemos dicho que el cambio de sentido de rotación de un motor se

obtiene cambiando el sentido de la corriente en uno de los dos circuitos, inducido o inductor.

La figura 338 representa un reostato de arranque con cambio de sentido de rotación por inversión de la corriente en el inducido. En este aparato hay cuatro sectores *I*, *II* y *I'*, *II'*. Cada uno de los sectores *I* y *I'* está constituído por diez contactos separados por partes aislantes (partes negras de la figura). Entre estos contactos están las resistencias de arranque: de 1 a 8 para la marcha adelante, y de 1' a 8' para la marcha atrás. Los sectores *II* y *II'* son de cobre. La manivela *M* lleva dos láminas de cobre *ab* y *a'b'* aisladas entre sí y de la manivela; los extremos *a* y *a'* de estas láminas se apoyan sobre los sectores *I* y *I'*, mientras que los extremos *b* y *b'* se apoyan sobre los sectores *II* y *II'*.

Cuando el motor está parado, la manivela ocupa la posición *OO'*. Para que el motor se ponga en marcha adelante se mueve la manivela en el sentido de la flecha F_1; se ve que cuando ocupa la posición *A*, las resistencias puestas en serie con el inducido son: 1, 2, 3, 6, 7, 8, y que estas resistencias van disminuyendo a medida que la manivela gira en el sentido de F_1. Para la marcha atrás, se mueve la manivela en el sentido de la flecha F_2; cuando ocupa la posición *B*, las resistencias en serie con el inducido son: 1' y 8'. La corriente en el inducido es entonces de sentido inverso que la que lo recorre cuando la manivela ocupa la posición *A*.

La figura 339 representa un aparato de arranque con cambio de sentido de rotación y ruptura de la corriente de excitación al mismo tiempo que la ruptura de la corriente en el inducido.

La manivela tiene cuatro láminas aisladas unas de otras y terminadas cada una en dos escobillas. La

escobilla *a* de la primera puede apoyarse sobre los contactos del sector *I*, mientras que la escobilla *b* se apoya

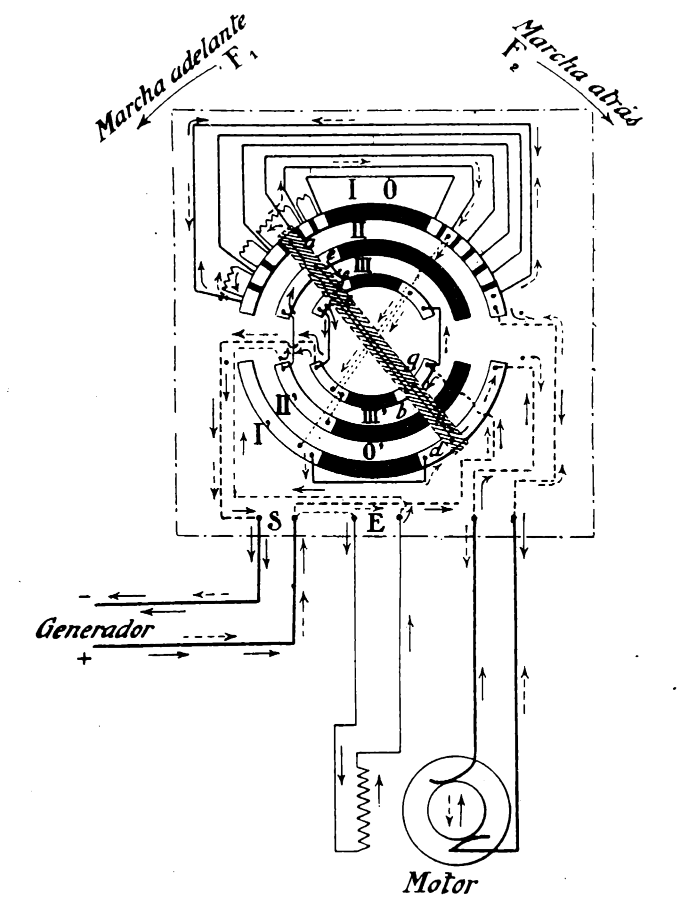


Fig. 339.

sobre *III'*. Las escobillas *c* y *d* de la segunda lámina ponen en comunicación los sectores *III* y *I'* entre sí; las escobillas *e* y *f* unen a *II* y *III*; y *g*, *h* a *II'* y *III'*.

La marcha adelante se consigue moviendo la manivela en el sentido de la flecha F_1 y la marcha atrás moviéndola en el sentido de F_2. Es fácil seguir en la figura el sentido de las corrientes en el inducido y en el inductor para los dos sentidos de rotación del motor.

CONTROLLER. — Se emplean ordinariamente para regular los motores ciertos aparatos muy útiles cuando hay que hacer frecuentemente arranques y cambios de sentido de rotación.

Estos aparatos se designan generalmente con la palabra norteamericana *controller,* que significa «regulador». Se ha intentado sustituir este nombre por los de combinador, regulador, acoplador, pero sin éxito; el uso ha consagrado la palabra controller, aceptada por casi todos los países. En la práctica tranviaria se le suele llamar *controla*.

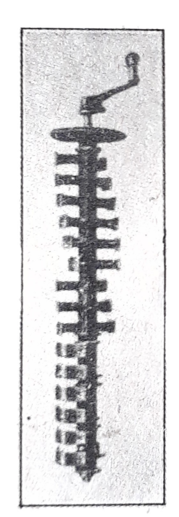


Fig. 340.

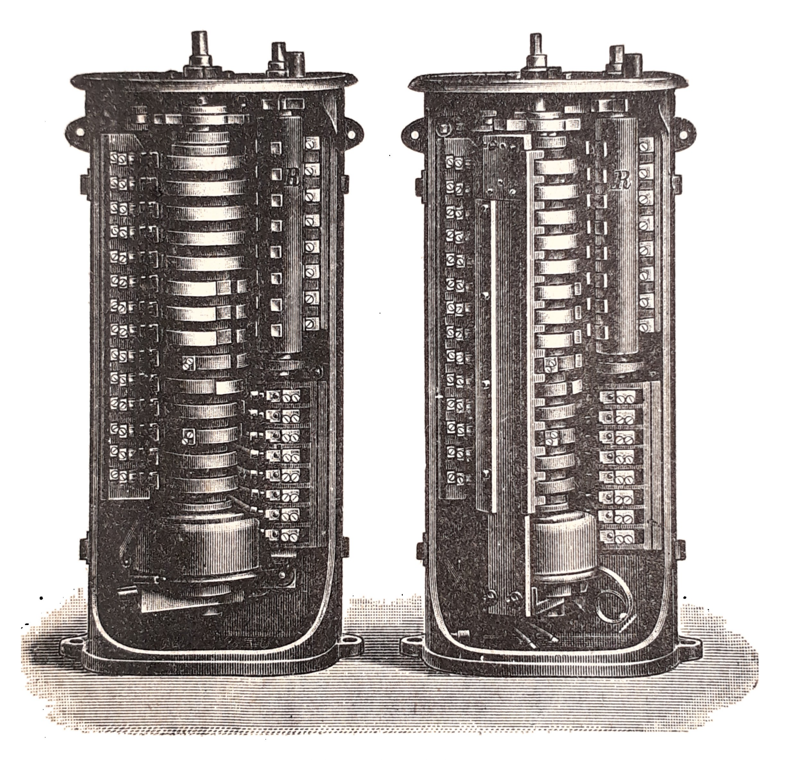
Un controller está formado por un cilindro, llamado ordinariamente *hélice,* cuyo eje es una barra de acero; esta barra está recubierta de un aislador inalterable al calor y a la humedad (fig. 340).

Sobre este cilindro aislante se fijan *segmentos* de cobre cuya longitud y posición están determinadas por el objeto particular a que están destinados. A lo largo de una generatriz están colocados, en una posición fija, *contactos* o *escobillas* unidas eléctricamente al motor o a los aparatos de puesta en marcha (figs. 341 y 342).

El cilindro que lleva los segmentos está accionado por una manivela, tomando un cierto número de posiciones que establecen conexiones determinadas entre el generador, el motor y las resistencias de arranque, por diferentes contactos entre los segmentos y las escobillas.

Los esquemas de las figuras 343 y 344 representan un controller de un motor que acciona un torno.

El cilindro lleva un doble sistema de segmentos: *A*, *B*, ..., *F*, *G* y *A'*, *B'*, ..., *F'*, *G'*, unidos entre sí



Figs. 341 y 342.

como indica la figura 344; el primero de estos grupos sirve para la marcha adelante del motor y el segundo para la marcha atrás. El eje del cilindro arrastra además la manivela *M* de un reostato de campo que permite obtener una aceleración de velocidad en los dos sentidos de rotación.

Siguiendo las corrientes indicadas por las flechas en la figura 344, se ve que cuando el cilindro gira en el sentido F_1, los segmentos F, E y D se apoyan sobre las escobillas f, e, d, y al mismo tiempo la manivela M está en O sobre el sector S. La corriente que viene del generador pasa directamente a la excitación y al indu-

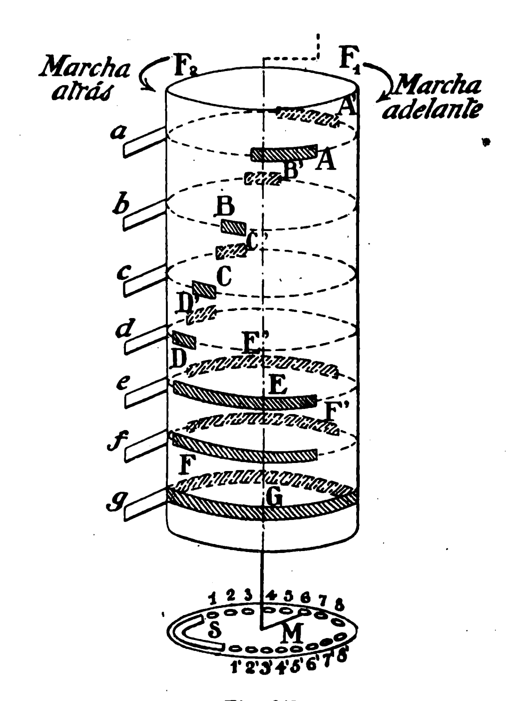


Fig. 343.

cido, a través de las resistencias de arranque R_1, R_2, R_3, por la escobilla d, los segmentos D y F, la escobilla f, y después de haber recorrido el inducido pasa por la escobilla e y el segmento E.

A medida que gira el cilindro se van quitando resistencias de arranque. Las flechas indicadas en la figura

representan el recorrido de la corriente en el inducido, cuando el segmento B se ha puesto en contacto con la escobilla b; entonces no hay más que la resistencia R_1 en serie con el inducido.

Haciendo girar el cilindro en el sentido F_2, se cambia la corriente en el inducido; las flechas de puntos

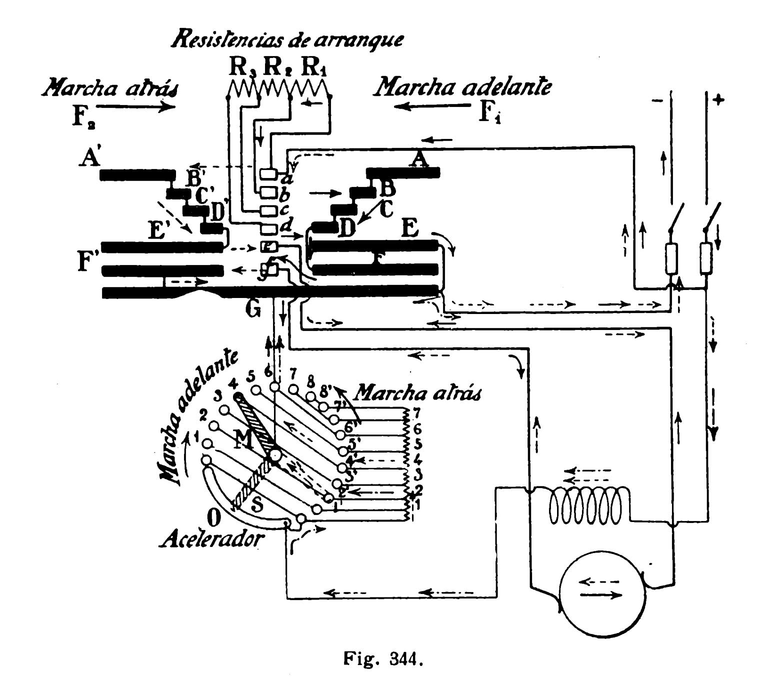


Fig. 344.

indican el recorrido de la corriente en este caso. Cuando se han quitado todas las resistencias de arranque, el segmento A' está en contacto con la escobilla a.

Durante la rotación del cilindro necesaria para poner el segmento A o el A' en contacto con la escobilla a, la manivela del regulador de inducción recorre el sector S. Si se continúa haciendo girar el cilindro,

A o *A'* permanece en contacto con *a*, y la manivela *M* se apoya sucesivamente sobre los contactos 1 a 8 ó 1' a 8', con lo cual aumenta progresivamente la velocidad.

Soplo magnético. — Cuando el cilindro pasa de una posición a la siguiente, se produce una chispa entre un segmento y su escobilla al cesar su contacto. Esta chispa produce la volatilización del cobre y por consiguiente un deterioro del aparato. Se evita este inconveniente por medio de un insuflador magnético.

Este sencillo aparato está fundado en el principio siguiente:

Cuando un conductor *AB* recorrido por una corriente *I* está colocado en un campo *NS*, este conductor está sometido a una fuerza *F* que tiende a moverlo perpendicularmente al plano formado por la dirección del campo magnético y de la corriente (fig. 345). Ahora bien, la chispa que salta entre un segmento y su escobilla está formada por vapores metálicos, a través de los cuales sigue pasando la corriente antes de cortarse. Para cortar esta chispa bastará colocar entre los dos contactos las dos ramas de un electroimán convenientemente orientado. La fuerza que ejerce el campo magnético del imán sobre el conductor arrastra los vapores metálicos, del mismo modo que si soplara sobre estos vapores, quedando interrumpida la corriente (fig. 346).

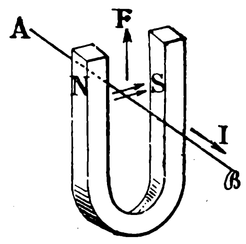
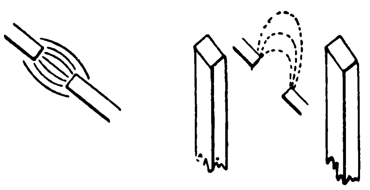


Fig. 345.


Fig. 346.

Se disponen en los controllers uno o varios electro-

imanes cuyos carretes están recorridos por la corriente de alimentación del motor y cuyas ramas polares están situadas entre las escobillas y los segmentos.

REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD POR LA TENSIÓN ENTRE LAS ESCOBILLAS. — Se puede reducir la velocidad de un motor por medio de un reostato en serie con el inducido (figura 347). Por estar el circuito inductor directamente derivado sobre la red, el flujo se mantiene constante; para un mismo trabajo desarrollado, es decir, para un mismo par motor, la corriente en el inducido permanece constante y la caída de tensión $R_1 I$ producida por las resistencias del reostato es proporcional al valor de la resistencia intercalada. Haciendo variar esta resistencia, se varía la tensión entre las escobillas y por consiguiente la velocidad del motor. Bastará tener un reostato de arranque cuyas resistencias tengan secciones suficientes para soportar constantemente la corriente en carga. Los reostatos de arranque ordinarios están construídos para un arranque bastante rápido, quince segundos a lo sumo.

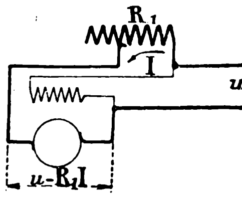


Fig. 347.

Este procedimiento no es recomendable, por la pérdida considerable de energía, en efecto Joule, en la resistencia adicional. Unicamente se emplea cuando se necesita una pequeña velocidad, durante un tiempo muy corto, y cuando la potencia del motor deba permanecer constante.

REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD POR LA RESISTENCIA DEL CIRCUITO MAGNÉTICO. — De todos los medios que pueden emplearse para obtener variaciones de reluctancia, el único realizado prácticamente es el que consiste en actuar sobre el entrehierro mediante polos de núcleos móviles; estos motores los construye la casa

Couffinhal, de Saint-Etienne, y mediante los mismos se consigue una importante variación de velocidad con una buena conmutación y con un desvío fijo de las escobillas.

Pero tienen el inconveniente de no poderse regular a distancia y de tener un mecanismo muy complicado y por consiguiente un precio bastante elevado. Los motores con polos complementarios, cuya regulación de velocidad se realiza mediante un regulador de inducción, tienen las mismas ventajas desde el punto de vista de la amplitud de las variaciones de velocidad y de carga y su empleo es más cómodo que el de los anteriores

d) **El motor ha de sufrir variaciones cuyo valor oscila entre las relaciones de 1 a 1,25 y de 1 a 3 aproximadamente.**—Se emplea en este caso un motor shunt con polos auxiliares o *polos de conmutación,* que son pequeñas piezas polares colocadas entre los polos principales y sobre las cuales hay devanadas varias espiras en serie con el devanado del inducido (fig. 348). Estos polos producen en la zona neutra un campo magnético que asegura una conmutación sin chispas, cualesquiera que sean la carga y la velocidad (véase el tomo I).

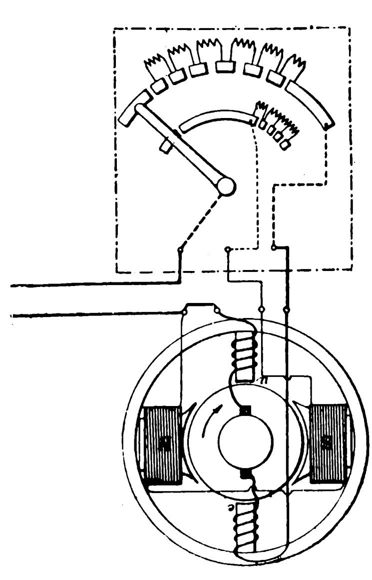


Fig. 348.

Las conexiones y el sentido del devanado de las espiras sobre los polos de conmutación deben ser tales, que cada polo auxiliar *esté precedido,* respecto al sentido de rotación, por un polo principal de la misma polaridad.

CASO DE DISTRIBUCIÓN DE VARIOS HILOS. — Si se dispone de una distribución con varios hilos, se puede variar la velocidad dentro de límites muy amplios aplicando entre las escobillas las diferentes tensiones entre conductores.

Si, por ejemplo, se tiene una distribución con tres hilos a 440 volts entre los conductores extremos y 220 entre cada uno de ellos y el neutro, se puede utilizar el motor de la manera siguiente (fig. 349):

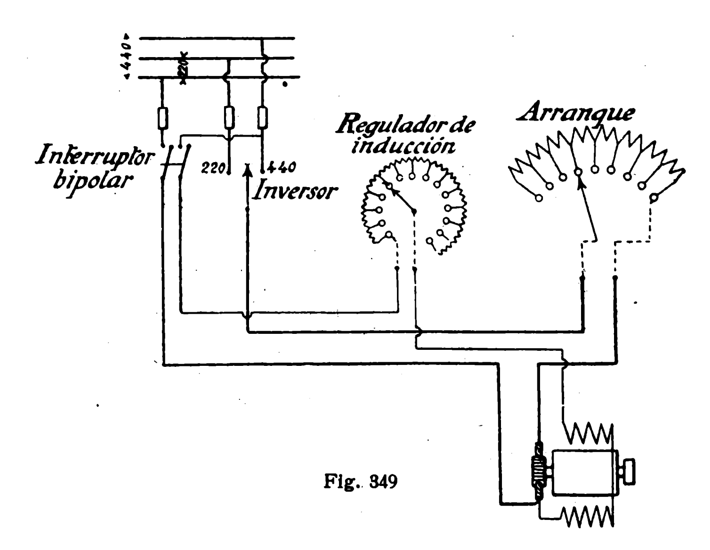


Fig. 349

1.° Entre las escobillas, tensión mínima: 220 volts; entre los bornes de la excitación, tensión máxima: 440 volts; velocidad mínima; aumento progresivo de la velocidad por el regulador de inducción

2.° Entre las escobillas, tensión: 440 volts; corriente de excitación máxima; aumento progresivo de la velocidad por el regulador de inducción.

e) **La velocidad del motor ha de variar entre límites muy amplios, pudiendo alcanzar la relación de 1 a 10.** — Se puede cumplir esta condición mediante los distintos procedimientos siguientes:

I. *Máquina con dos colectores.* — Sobre el núcleo del inducido hay dos devanados independientes uno de otro, unidos respectivamente a dos colectores colocados a distinto lado de la armadura. Así se tienen dos motores distintos acoplados sobre un mismo árbol, pudiéndose montar estos motores en serie o en paralelo.

Cuando los inducidos están en serie, todo se verifica como si se tuviera un motor cuyo número de espiras inducidas fuera el doble de las de uno solo o de los dos montados en paralelo. Ahora bien, se sabe que la velocidad, a igualdad de las demás condiciones, es inversamente proporcional al número de espiras (página 233), por consiguiente la velocidad se hará doble al pasar del agrupamiento en serie al agrupamiento en paralelo.

La figura 350 representa el esquema de montaje de un motor con dos colectores, regulado con un controller y alimentado por una red de tres hilos bajo la tensión de 220 volts entre los extremos y 110 volts por puente.

El controller comprende en un mismo cuerpo:

1.° Un cilindro de acoplamiento de los colectores que permite acoplar los dos inducidos: en serie bajo 110 volts, en serie bajo 220 volts, y en paralelo bajo 220 volts;

2.° Un cilindro para el arranque;

3.° Un regulador de inducción.

El cilindro de acoplamiento lleva tres series de contactos *I*, *II*, *III*, que pueden tocar sucesivamente con las escobillas *A*, *B*. Cuando el grupo *I* se encuentra sobre las escobillas, los dos inducidos están en

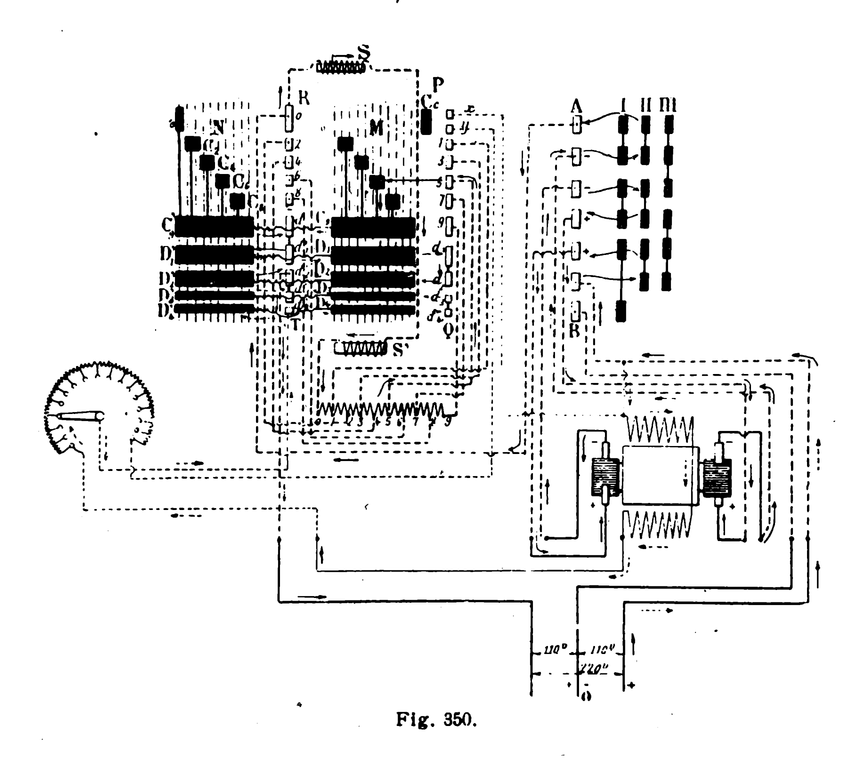


Fig. 350.

serie bajo 110 volts; cuando el grupo *II* y después el *III* suceden al *I*, los inducidos están en serie bajo 220 volts, y luego en paralelo bajo 220 volts. Las flechas trazadas en la figura señalan el recorrido de la corriente en el caso en que los dos inducidos estén en serie bajo 220 volts.

Es muy fácil seguir el recorrido de la corriente en los otros dos casos.

El cilindro de arranque está formado de dos grupos de contactos móviles M y N, y de dos grupos de escobillas fijas PQ, RT.

Al ponerse en marcha, el contacto C_9 de M toca con la escobilla 9 de PQ; la corriente que parte del polo + del generador, después de atravesar los inducidos, llega por A a la escobilla O, pasa por los insufladores magnéticos S, S', por el conjunto de resistencias de arranque, de 0 a 9, atraviesa C_9, C'_9 que está en contacto con d, pasa de d a d'_1 a D'_1, D_1, d_1, d_2, D_2, D'_2, d'_2, que está en contacto con D'_2, y vuelve de d'_2 al polo — del generador. Siguiendo girando el cilindro se van suprimiendo poco a poco las resistencias del reostato de arranque. Las flechas indican el recorrido de la corriente cuando el contacto C_5 toca con la escobilla 5. Se ve fácilmente que cuando el contacto C_0 llega a la escobilla O, todas las resistencias de arranque están suprimidas. Si se sigue girando, la corriente se corta sobre el inducido y el inductor, pero en el momento de cortarse, el contacto C_c se apoya sobre las escobillas x, y, cerrándose así el circuito de excitación sobre la totalidad de las resistencias del regulador de inducción, de modo que se evitan las chispas de ruptura de la corriente de excitación.

Las flechas de trazos discontinuos indican la marcha de la corriente de excitación que está producida siempre por la tensión de 220 volts. Se ve que la corriente, después de haber atravesado el circuito de excitación y el regulador de inducción, llega por la manivela de este regulador a la escobilla d'_4, pasa sucesivamente por D'_4, D_4, d_4, d_3, D_3, D'_3, y vuelve por d'_2 al polo — del generador.

Observación. — Cuando se emplea un solo inducido con dos colectores, hay que tener en cuenta que en el

momento de pasar del acoplamiento en serie al acoplamiento en paralelo y al contrario, se produce una sacudida. Para evitar esta sacudida es preciso parar las máquinas.

En lugar de un solo motor con dos inducidos, se pueden emplear dos motores idénticos montados sobre un mismo árbol. En este caso se puede obtener la

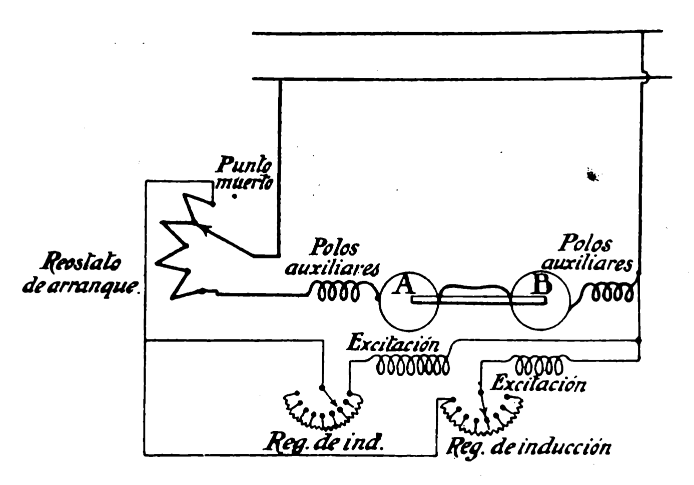


Fig. 351.

variación total de velocidad de un modo continuo. Para conseguirlo, se empieza por variar la excitación del motor *A* hasta hacerla nula; en este momento el motor *B* tiene la tensión total en los bornes del inducido, y todo el sistema gira con una velocidad doble de la que tendría con corrientes de excitación que desarrollaran fuerzas contraelectromotrices iguales (figura 351). A continuación se puede operar sobre la excitación del motor *B* para acelerar su velocidad. Esta disposición es bastante costosa.

II. *Procedimiento por variación de tensión.* —

Este procedimiento consiste en variar la tensión aplicada entre los bornes del motor *M*, poniéndole en serie, sobre las líneas de alimentación, un generador *G* en que se puedan variar la magnitud y el sentido de la fuerza electromotriz. Este generador está movido por un motor *M'* alimentado por las mismas líneas que el motor *M*.

Supongamos, por ejemplo, que se tiene una distribución bajo 220 volts. Las dos máquinas *M'* y *G* están construídas para funcionar ambas bajo 220 volts y sus

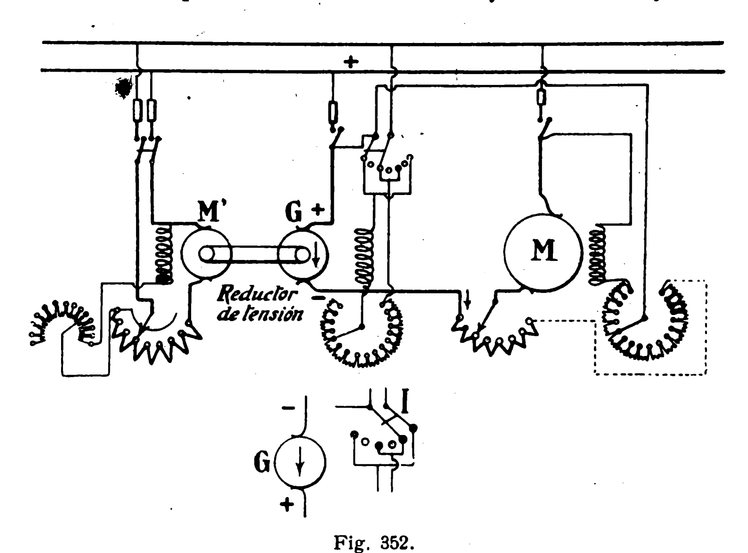


Fig. 352.

respectivas potencias son iguales a la mitad de la del motor *M*, que está calculado para poder funcionar bajo 440 volts. La corriente de excitación de la máquina *G* puede invertirse mediante un inversor *I* (figura 352).

Si se quiere dar al motor *M* una velocidad muy pequeña, se coloca el inversor de tal modo que la

máquina G produzca una fuerza electromotriz E opuesta a la tensión aplicada, 220 volts. La tensión entre las escobillas de M es entonces $U = 220 - E$, despreciando la pequeña caída de tensión en G. En estas condiciones la máquina G es recorrida por una corriente dirigida en sentido inverso de la que tiende a producir, y gira como un motor, moviendo a la máquina M' que devuelve a la red la energía absorbida por G, la cual desempeña entonces el papel de *reductor de tensión*. Regulando la fuerza electromotriz de G con su regulador de inducción, se podrá obtener para U un valor muy pequeño y por consiguiente una velocidad muy reducida del motor M. Por ejemplo, si se hace $E =$ $= 180$ volts, se tiene:

$$U = 220 - 180 = 40 \text{ volts}$$

(despreciando la pequeña caída de tensión en el inducido de G).

Cuando se va disminuyendo la fuerza electromotriz E, aumenta U y por consiguiente la velocidad: si se llega a un valor de E muy pequeño, U tomará el valor 220 volts y el motor M tendrá una velocidad aproximadamente igual a la mitad de su velocidad máxima. Para que siga aumentando la velocidad, se invierte la corriente de excitación de G, que obra entonces como *elevador de tensión* sumando su tensión a la de la línea. En los bornes del inducido de M, la tensión será $U = 220 + E$. Este es el caso representado en la parte inferior de la figura 352.

Actuando sobre el regulador de inducción de G y sobre la velocidad de M', se puede aumentar E hasta 220 volts y por consiguiente U hasta 440 volts, para cuyo valor la velocidad será máxima.

III. *Sistema Léonard.* — Cuando la energía está distribuída por corriente alterna, no se puede emplear

la disposición anterior: en este caso se recurre al método «Léonard», que consiste en alimentar respectivamente los circuitos inducido e inductor del motor *M* por dos generadores *G* y *E* movidos por un motor de corrientes alternas *m* (fig. 353). Mediante el regulador

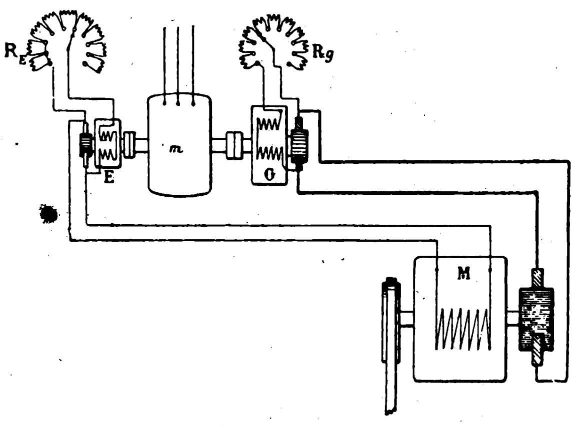


Fig. 353.

de inducción R_g del generador *G*, se varía la tensión entre las escobillas de *M*; por medio del regulador de inducción R_E del generador *E*, se obra sobre el campo de *M*, y combinando estas dos acciones, se pueden lograr grandes variaciones de velocidad para el motor *M*.

Observación. — Estos últimos procedimientos se emplean en industrias especiales que requieren que una misma máquina pueda funcionar a velocidades muy diferentes: fabricación de papel, industria minera, máquinas de extracción, etc.

f) **La velocidad del motor debe mantenerse constante automáticamente, cualquiera que sea la carga.** — El procedimiento más seguro consiste en fijar en el

extremo del árbol un regulador de velocidad que obre por fuerza centrífuga sobre un regulador de inducción.

También se puede emplear un motor compound con excitación serie diferencial, es decir, montado de tal modo, que el flujo producido por la excitación serie esté dirigido en sentido inverso del flujo principal debido a la excitación shunt, lo cual tiende a mantener constante la velocidad del motor, cualquiera que sea la carga. En efecto, se ha visto que la velocidad está dada por la relación:

$$N = \frac{(U - rI)\,10^8}{n\,\Phi}$$

Cuando la carga aumenta, la corriente I crece, es decir, disminuye el numerador de la expresión precedente; pero al mismo tiempo el flujo resultante Φ disminuye por haber aumentado el número de amperes-vueltas de la excitación serie, disminuyendo por consiguiente el denominador, es decir, tendiendo el valor de la fracción N a mantenerse constante.

Se comprende que es posible calcular un motor de modo que su velocidad permanezca automáticamente invariable entre los límites dados de la carga. Pero este procedimiento es peligroso, porque si, a consecuencia de un aumento excesivo de la carga, la corriente tomada por el motor pasara de un valor límite, los polos magnéticos de la máquina se invertirían y, como el sentido de la corriente en el inducido no cambia, el sentido de rotación se invertiría también bruscamente.

En realidad son muy pocos los casos en que la industria exige una velocidad rigurosamente constante; esta condición es de excepcional importancia para los hilados, tejidos y fabricación de papel, pero en estos casos el problema se simplifica por ser la carga constante.

II. Motores serie

Estos motores están caracterizados por una variación del flujo inductor en el mismo sentido que la variación de la corriente en el inducido. El tipo de estas máquinas es el motor de excitación serie en que el circuito inductor, de hilo grueso, en serie con el inducido, es recorrido por la misma corriente que el inducido.

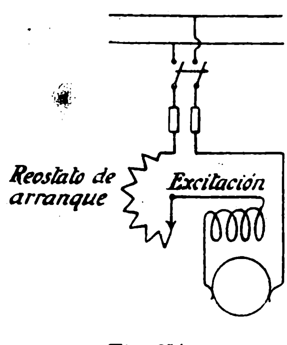


Fig. 354.

Para montar un motor de esta clase, basta ponerle en serie un reostato de arranque, como indica la figura 354. Se pone en marcha haciendo avanzar poco a poco la manivela del reostato de arranque, de modo que se vayan suprimiendo resistencias. La corriente I en el inducido aumenta; al mismo tiempo aumenta el flujo inductor Φ y por consiguiente el par motor, que es proporcional al producto $\Phi\ I$.

Se ve en seguida que este motor tiene la propiedad de tener un par de arranque que crece muy rápidamente con la corriente y que permite por lo tanto ponerlo en marcha a plena carga. Por consiguiente se empleará siempre que haya que desarrollar un par potente para el arranque, por ejemplo, en la tracción.

Pero tiene el inconveniente, que puede ser grave en muchos casos, de adquirir una velocidad excesiva si el par resistente toma un valor pequeño; en este caso se

dice que el motor *se embala*. En efecto, se ha visto (página 233) que la velocidad está dada por la relación:

$$N = \frac{(U - rI)\,10^8}{n\,\Phi}.$$

Si el par resistente disminuye, la corriente tomada por el motor disminuye, lo cual hace aumentar el numerador, pero al mismo tiempo el flujo disminuye y los dos efectos contribuyen a aumentar la velocidad. Si el par resistente se hace muy pequeño, la corriente tomada por el motor es también muy pequeña; el denominador es muy pequeño y por consiguiente la velocidad muy grande.

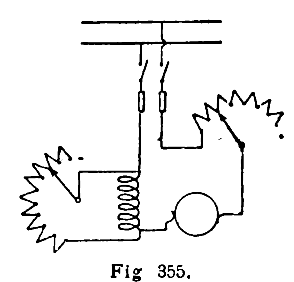


Fig 355.

Este motor sólo se empleará en el caso en que el par resistente no pueda hacerse demasiado pequeño y principalmente cuando este par crezca con la velocidad o cuando siempre sea posible impedir que el motor se embale.

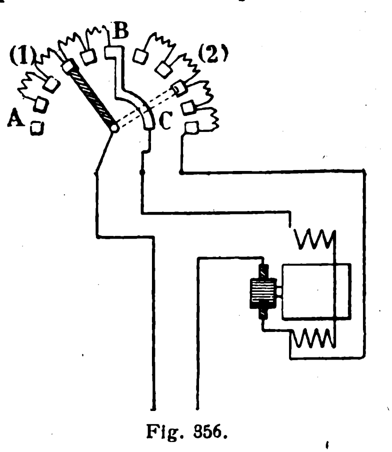
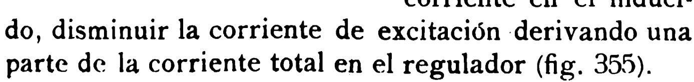


Fig. 356.

Si se quiere actuar sobre la velocidad, se dispone un regulador de inducción en derivación sobre el circuito de excitación, lo cual permite, sin cambiar la corriente en el inducido, disminuir la corriente de excitación derivando una parte de la corriente total en el regulador (fig. 355).


do, disminuir la corriente de excitación derivando una parte de la corriente total en el regulador (fig. 355).

La figura 356 representa un aparato de arranque con acelerador gobernando un motor serie. El conjunto de las resistencias (1) constituye el reostato de arranque, y las resistencias (2) el regulador de inducción. Se arranca moviendo la manivela de A a B; si se sigue moviendo más allá de B, la corriente pasa directamente al inducido por la prolongación C del contacto B, y una parte se desvía en las resistencias (2), lo cual acelera la velocidad.

Se pueden obtener grandes variaciones de velocidad montando sobre un mismo árbol los inducidos de dos motores y acoplándolos en serie, o en paralelo.

Cuando se acoplan en serie, no están sometidos más que a la mitad de la tensión de la red y su velocidad es pequeña. Al contrario, si están en paralelo, cada uno de ellos soporta la tensión de la red y la velocidad se encuentra aproximadamente duplicada.

Este procedimiento se sigue generalmente para los tranvías; la regulación se efectúa mediante dos controllers idénticos usados alternativamente a la ida y a la vuelta. Cada controller está provisto, además del cilindro de conexiones de los motores, de otro cilindro regido por una manivela que sirve para invertir el sentido de la marcha del vehículo, y para frenar, haciendo funcionar los motores como generadores cerrados sobre una resistencia o un cortocircuito. Cualesquiera que sean los constructores, las dos disposiciones empleadas no difieren entre sí más que en los detalles; por consiguiente creemos suficiente seguir las conexiones establecidas en un tipo cualquiera, para comprender su funcionamiento.

Siguiendo las conexiones indicadas en las figuras 357 y 358 se ve que cuando el cilindro C_1 del controller está en la posición 1, los dos motores están en serie, y en serie con ellos las resistencias R_1 y R_2. Cuando se

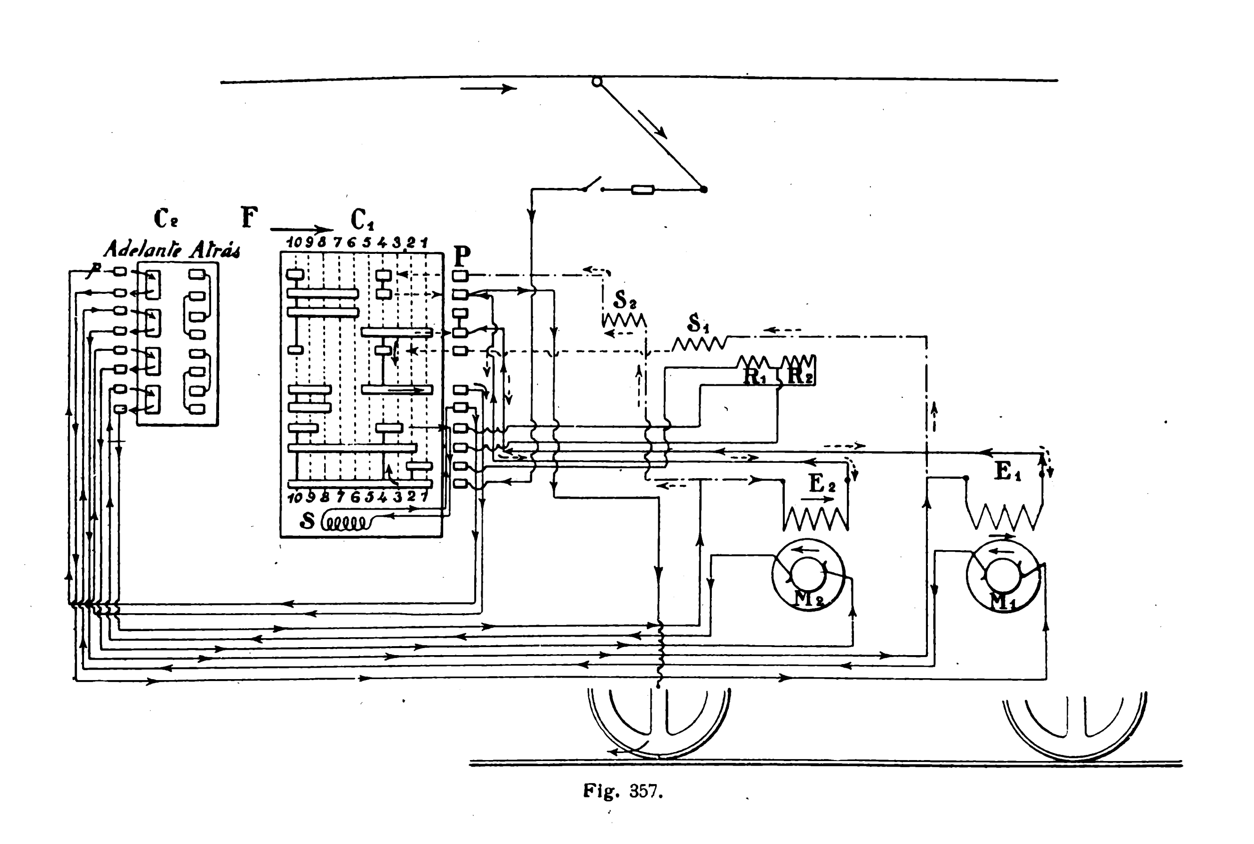


Fig. 357.

avanza el cilindro en el sentido de la flecha F de modo que vaya ocupando sucesivamente las posiciones 2 y 3, se suprime la resistencia R_1 y después la R_2; el motor

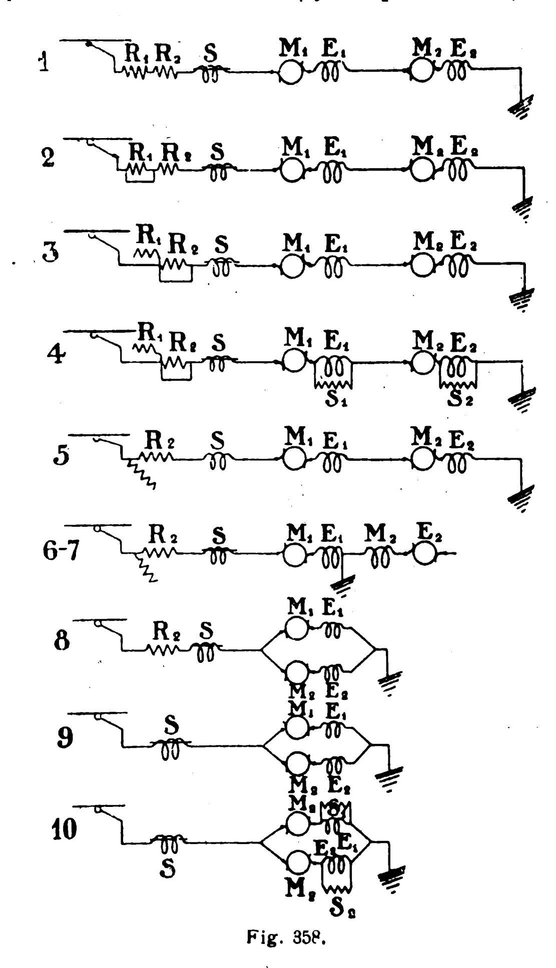


Fig. 358.

arranca entonces y marcha a la velocidad mínima. Al pasar a la posición 4, los inductores de los dos motores se han shuntado por las resistencias S_1 y S_2, y la

velocidad aumenta. Las flechas indicadas en la figura señalan el camino seguido por la corriente cuando el cilindro C_1 del controller está en esta posición (las escobillas P están sobre la línea 4).

El paso de este acoplamiento al acoplamiento en paralelo, se efectúa por las posiciones intermedias 5, 6, 7, en las cuales se suprime un motor después de haberle puesto una resistencia R_2 en serie.

Pasando a la posición 8, se acoplan los dos motores en paralelo dejando una resistencia R_2 en serie, después se suprime esta resistencia (posición 9), y por último se shuntan los circuitos de excitación de los motores (posición 10), alcanzándose así la velocidad máxima.

Se ve fácilmente que si se gira el cilindro C_2 de modo que los sectores de la derecha se pongan en contacto con las escobillas p, se cambia el sentido de la corriente en los inducidos de los motores sin cambiar el sentido en los circuitos inductores, por lo cual se invierte la marcha del vehículo.

CAPÍTULO VIII

Motores de corriente alterna

I. Motores asincrónicos polifásicos

Se sabe que un motor asincrónico polifásico está compuesto:

1.° De una parte fija, que se llama *inductor* o *estator*, formada por una serie de circuitos cuyos conductores van alojados en ranuras practicadas en una masa de láminas de hierro muy delgadas y convenientemente aisladas. Cuando pasan por estos circuitos corrientes polifásicas, se producen uno o varios campos giratorios;

2.° De una parte móvil formada por conductores cerrados sobre sí mismos, y que se llama *inducido* o *rotor*.

La rotación del rotor se explica fácilmente: los campos giratorios creados por el estator producen en los conductores del rotor corrientes inducidas. Estas corrientes inducidas desarrollan por su acción sobre el campo un par que hace mover al rotor en el mismo sentido que el campo En efecto, según la ley de Lenz, las corrientes inducidas tienen un sentido tal, que tienden a oponerse a la causa que las produce. Ahora bien, esta causa es el movimiento relativo del rotor y del

campo giratorio; por consiguiente el rotor gira de modo que el movimiento relativo tiende a desaparecer y por lo tanto en el mismo sentido que el campo.

Resbalamiento. — Por la misma razón, el rotor tiende a tomar la misma velocidad que el campo, pero gira, sin embargo, más despacio, porque si llegara a alcanzar esta misma velocidad, las espiras del inducido no serían cortadas por el campo, luego no habría más corrientes inducidas y por lo tanto no habría par motor.

Si ω_1 es la velocidad angular del campo giratorio y ω' la velocidad de rotación del rotor, ω' es menor que ω_1 y la diferencia $g = \omega_1 - \omega'$ se llama *resbalamiento*.

Sabemos que si el estator contiene p grupos de circuitos polifásicos, produce p campos giratorios de velocidad $\frac{\omega}{p}$, siendo ω la pulsación de las corrientes polifásicas que alimentan el estator. Es decir, que un estator formado por seis grupos de tres circuitos recorridos por corrientes trifásicas de frecuencia 50, o sea de pulsación $2\pi \times 50$, produce seis campos giratorios de velocidad

$$\omega_1 = \frac{2\pi \times 50}{6} \text{ radiantes por segundo,}$$

es decir,

$$\frac{2\pi \times 50}{6 \times 2\pi} = \frac{50}{6} \text{ vueltas por segundo ó 500 vueltas por minuto.}$$

Por consiguiente, si el estator produce p campos giratorios, o sea, si tiene $2p$ polos, la velocidad angular de estos campos es:

$$\omega_1 = \frac{\omega}{p},$$

y el resbalamiento tiene por valor:

$$g = \frac{\omega}{p} - \omega'.$$

Las corrientes inducidas en el rotor son producidas por esta velocidad relativa g y tienen por pulsación el valor de g, o sea, por frecuencia, $\frac{2\pi}{g}$.

Par motor. — Se demuestra que el par motor desarrollado en el árbol del rotor tiene por valor:

$$C = \frac{m}{4} \frac{Rg\Phi_0^2}{R^2 + \mathcal{L}^2 g^2};$$

siendo:

Φ_0, el flujo máximo a través de una espira formada por dos conductores del rotor;
m, el número de conductores del rotor;
R y $\mathcal{L}$, la resistencia y el coeficiente de autoinducción del rotor.

Al estudiar las variaciones del par con el resbalamiento g, se ve que:

1.º El par motor es cero cuando el resbalamiento es cero, es decir, cuando el rotor gira con la misma velocidad que el campo;

2.º El par crece al mismo tiempo que el resbalamiento y alcanza su valor máximo cuando el resbalamiento llega a un valor g, tal que:

$$R = \mathcal{L} \times g \quad \text{o sea} \quad g = \frac{R}{\mathcal{L}};$$

3.º El par decrece cuando el resbalamiento sigue aumentando desde el valor $g = \frac{R}{\mathcal{L}}$ hasta el valor má-

ximo, que alcanza cuando la velocidad ω' del inducido es cero, en cuyo caso:

$$g = \frac{\omega}{p}$$

Estas variaciones del par en función del resbalamiento están representadas por la curva de la figura 359.

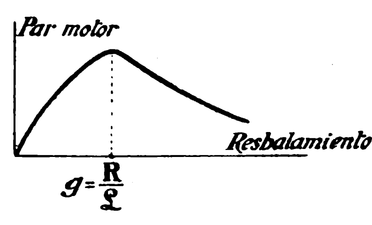


Fig. 359.

De todo lo anterior se deduce que, cualesquiera que sean las condiciones de funcionamiento del motor, la relación $R = \mathcal{L} \times g$ quedará satisfecha, o por lo menos la resistencia R tendrá un valor todo lo aproximado que sea posible al del producto $\mathcal{L} \times g$.

Ahora bien, al arrancar, el resbalamiento g tiene su valor máximo $\frac{\omega}{p}$, por ser $\omega' = 0$; por consiguiente R habrá de tener en ese momento su valor máximo, cuyo valor irá decreciendo a medida que el resbalamiento disminuya, al mismo tiempo que la velocidad ω' crece hasta alcanzar el valor de la velocidad de régimen.

Hay dos tipos de estos motores:

El motor con rotor en cortocircuito o de jaula de ardilla;

El motor con rotor devanado.

A. Motores con rotor en cortocircuito o de jaula de ardilla

Este rotor está formado por una serie de conductores de cobre dispuestos según las generatrices de un

cilindro y cuyos extremos están unidos a dos anillos de cobre.

Todos estos conductores puestos así en cortocircuito están alojados en un cilindro constituído por láminas de hierro dulce aisladas entre sí (fig. 360).

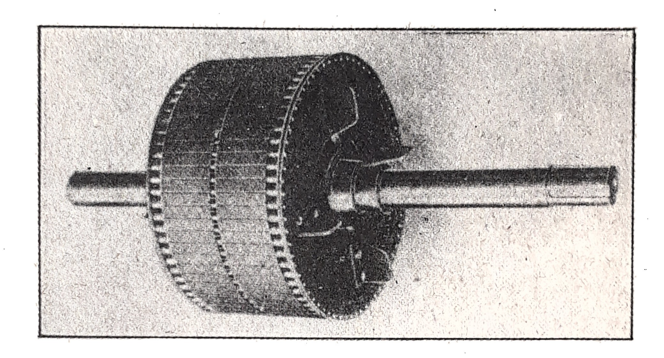


Fig. 360.

Se ve fácilmente que estos motores desprovistos de colector, anillos, escobillas y cuyo circuito inductor fijo está unido solamente al circuito de alimentación, son muy fuertes y de construcción sencilla.

Pero esta ventaja está contrarrestada por la dificultad que se encuentra en el arranque. En efecto, la resistencia del rotor es constante y está determinada por el constructor de tal modo que a la velocidad de régimen y para la carga normal, la condición $R = \mathcal{L} g$ quede satisfecha. Pero al arrancar, g tiene un valor mayor que en marcha por ser la velocidad del rotor nula, siendo este valor máximo $g' = \frac{\omega}{p}$, de modo que al arrancar, R es bastante menor que $\mathcal{L} \times g'$ y el par motor es insuficiente.

La única manera de hacer arrancar estos motores

consiste en emplear poleas locas o sistemas de embrague progresivo.

Pero, aun tomando estas precauciones, la corriente tomada al arrancar es bastante mayor que la corriente normal, lo cual ocasiona sacudidas capaces de producir variaciones bruscas de voltaje. Por esta razón, el empleo de este tipo de motor está reglamentado por las centrales, sobre todo cuando estas centrales distribuyen la energía al mismo tiempo para la luz y para la fuerza motriz.

La mayor parte de compañías de distribución imponen los valores máximos siguientes:

POTENCIA ÚTIL	0,4 a 0,75 KW	0,75 a 1,5 KW	1,5 a 5 KW	5 a 15 KW	> 15 KW
Relación KVA al arrancar / Kw útiles sobre el árbol	7	5	37	2,2	1,8
Relación I al arrancar / I normal	3,8	3,1	2,5	1,6	1,4

Por consiguiente, estas condiciones exigen el empleo de dispositivos especiales para el arranque.

Motor de poca potencia. — Los motores de poca potencia pueden arrancar, de vacío (o en carga, si mueven aparatos ligeros y bien equilibrados), directamente al cerrar el interruptor.

Estos motores pueden soportar variaciones considerables de voltaje, y pueden funcionar bajo una tensión variable de 110 a 120 volts, 220 a 240...

Un motor puede utilizarse con tensiones muy diferentes, según la manera de estar montados los circuitos del estator.

Por ejemplo, un motor trifásico, que funciona normalmente con 200 volts cuando los tres circuitos del estator están en estrella, funcionará en las mismas con-

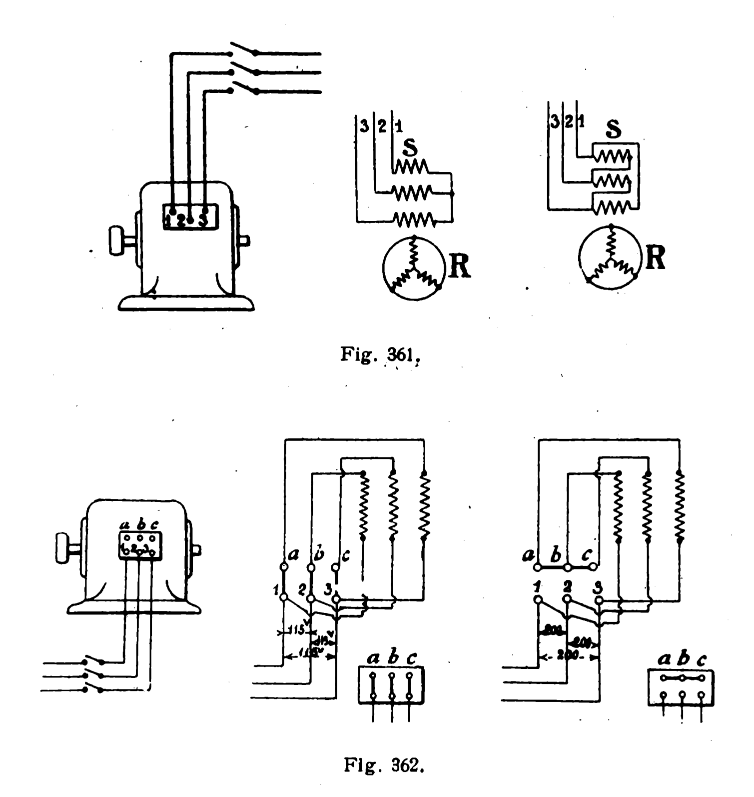


Fig. 361.

Fig. 362.

diciones con $\frac{200}{\sqrt{3}} = 115$ volts si se montan los tres circuitos en triángulo, pues en ambos casos los circuitos del rotor están sometidos a la misma tensión de 115 volts (figura 361).

Los constructores dan ordinariamente los motores de este tipo para dos valores medios de la tensión, por

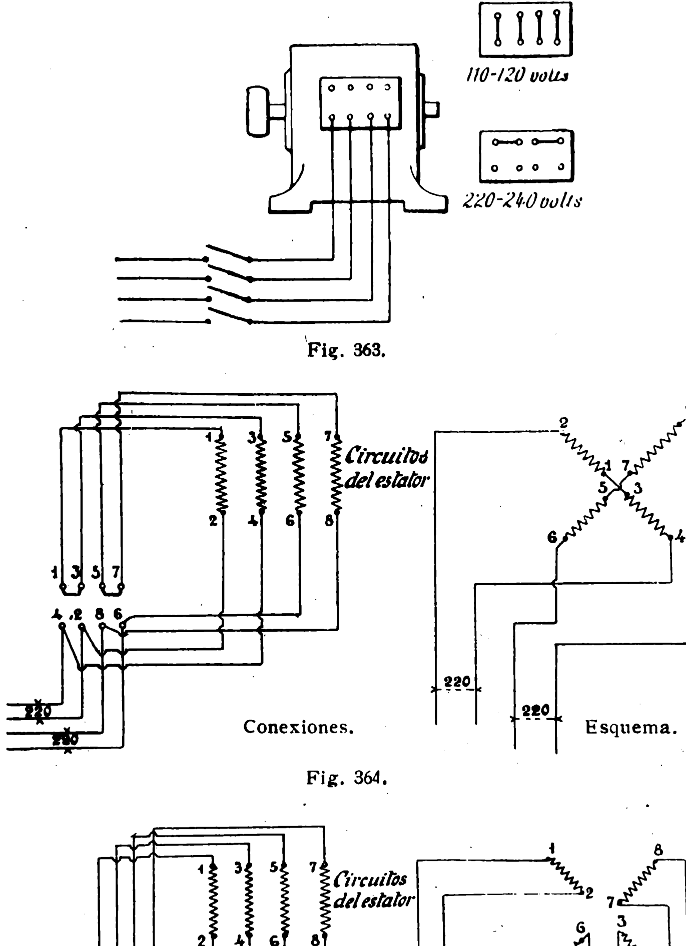


Fig. 363.

Fig. 364.

Fig. 365.

ejemplo 115 y 200 volts. Mediante cajas de conexión fijadas en la armazón se puede efectuar el montaje en triángulo o en estrella de los circuitos del estator, del modo indicado en la figura 362, y de la misma manera para los motores bifásicos (figs. 363 a 365).

Arranque con par resistente pequeño. — Las prescripciones de las centrales exigen que la corriente tomada por el motor, al arrancar, no exceda considerablemente de la corriente de plena carga. Se puede satisfacer esta condición con motores en cortocircuito de una cierta potencia, si no tienen que desarrollar, al arrancar, más que un par bastante pequeño; basta para ello bajar la tensión, para la puesta en marcha, y después volver a la tensión normal cuando se ha llegado a la velocidad de régimen.

Para conseguir estos resultados se emplean dos medios:

1.° Reducción de la tensión por un transformador.

2.° Montaje de los circuitos del estator en estrella para el arranque, y después en triángulo, para el trabajo.

1.° *Empleo de un transformador.* — Generalmente se reduce la tensión mediante un *autotransformador.* Un autotransformador está formado por un solo circuito cuyos extremos están unidos a las líneas

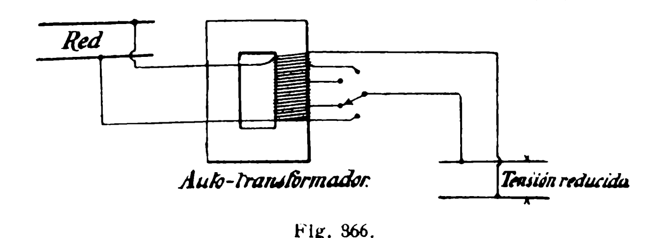


Fig. 366.

de alimentación; la tensión reducida se toma entre un extremo y otro punto variable del circuito (figs. 366 a 368). Se ve que es posible variar de este modo la tensión desde cero hasta la tensión entre las dos líneas.

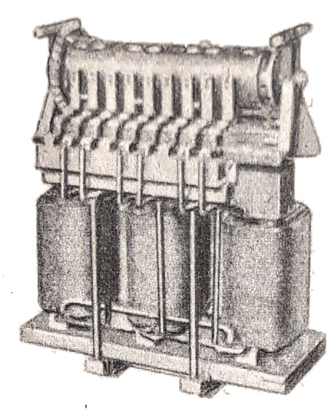


Fig. 367.

2.° *Funcionamiento en estrella-triángulo.* — Para arrancar se acoplan los circuitos trifásicos del estator en estrella, lo cual reduce la tensión aplicada a cada uno de los circuitos a $\frac{U}{\sqrt{3}}$, siendo U la tensión entre las líneas. Cuando el motor

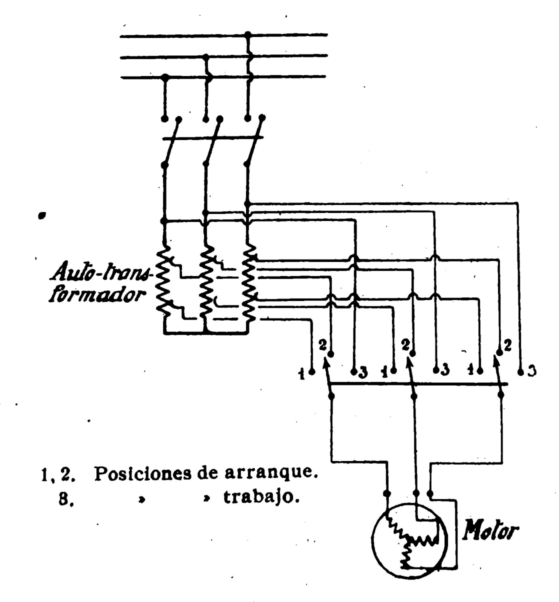


Fig. 368.

alcanza su velocidad, se acoplan los circuitos en triángulo, con lo cual vuelve al valor U la tensión aplicada a cada circuito.

Este acoplamiento se verifica mediante un inversor montado como indica la figura 369. Se ve que cuando la manivela del inversor está en la posición de arranque, una lámina pone en cortocircuito los bornes 6, 2 y 4, mientras que las otras tres láminas unen los bornes 1, 3 y 5 con los tres conductores de alimentación, y el motor arranca con la tensión reducida $\frac{U}{\sqrt{3}}$, pues los tres circuitos del estator están montados en estrella. Cuando el motor alcanza su velocidad, la manivela se lleva a la posición de trabajo, quedando por una parte unidos los tres bornes 1, 3, 5 con los conductores de alimentación A, B, C, y por otra parte los bornes 1 con 6, 2 con 3, y 5 con 4; los tres circuitos están en triángulo y bajo la tensión U.

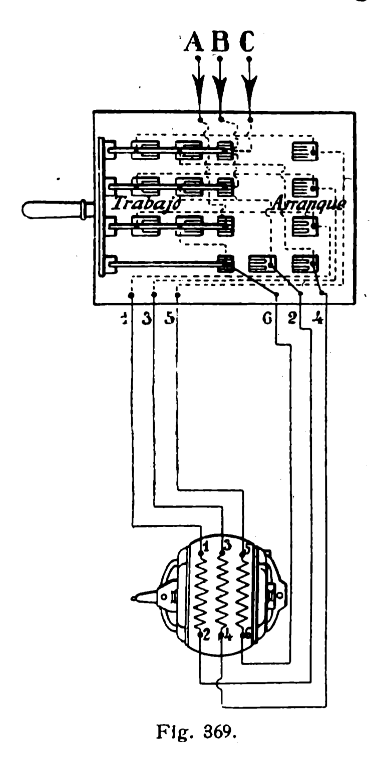


Fig. 369.

Motor con acoplador. — Según lo que dijimos en la página 269, es preciso, para obtener un par considerable al arrancar, sin necesidad de una corriente excesiva, aumentar la resistencia del inducido durante este

período hasta que tome un valor R' muy próximo a $\mathcal{L} \times g \left(\text{siendo } g \text{ el resbalamiento al arrancar, } g = \frac{\omega}{p}\right)$.

Puede obtenerse este resultado de otro modo que por la introducción de resistencias en serie con los devanados del rotor. Para ello se forma el inducido con dos devanados trifásicos, acoplados de tal manera que, al arrancar, los circuitos de cada uno de los dos devanados estén en oposición, de modo que todo se verifica como si se hubiera introducido una resistencia en cada fase. Después del arranque, cuando el resbalamiento ha tomado un valor pequeño, se hacen las conexiones de modo que las fuerzas electromotrices se sumen, lo cual produce el mismo efecto que si estas resistencias se hubieran puesto en cortocircuito.

Los acoplamientos se efectúan de diferentes maneras, según los constructores.

La «Sociedad Als-Thom» coloca sobre la armazón del rotor seis devanados defasados 60° entre sí, formándose dos grupos de circuitos trifásicos en estrella,

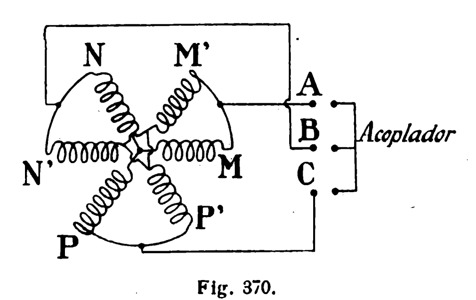


Fig. 370.

estando unidos los extremos libres entre sí como indica la figura 370. Las fuerzas electromotrices inducidas en estos circuitos están representadas por los dos grupos de vectores OA_1, OA_2, OA_3 y OA'_1, OA'_2, OA'_3 (fig. 371).

Las fuerzas electromotrices inducidas en dos circuitos unidos entre sí, por ejemplo OM y OM', están en oposición, luego la fuerza electromotriz resultante es la diferencia geométrica entre los dos vectores OA_1 y OA'_1, y es igual a la inducida en uno de los dos devanados OM u OM', y la resistencia del circuito formado es igual a $2R$, siendo R la resistencia de cada una de las partes de los dos devanados.

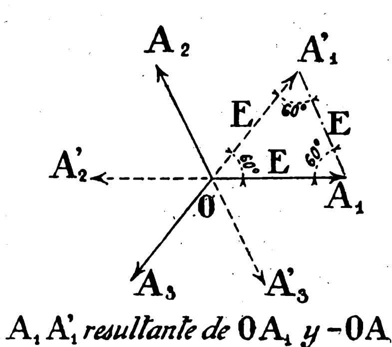


Fig. 371.

Después del arranque, los bornes A, B, C están en cortocircuito; los circuitos están dos a dos en paralelo, de modo que la resistencia de cada uno de los tres circuitos que constituyen el rotor es $\frac{R}{2}$ y la fuerza electromotriz inducida es la misma que al arrancar. Todo se verifica, por consiguiente, como si, al arrancar, se introdujera en el rotor una resistencia igual a cuatro veces la resistencia de cada rama.

Este acoplamiento se realiza ordinariamente por medio de un aparato de fuerza centrífuga, fijado en el extremo del árbol y encerrado en una caja.

Basta cerrar el interruptor y, cuando el motor alcanza una velocidad conveniente, el acoplador de

fuerza centrífuga establece y mantiene el cortocircuito entre los bornes *A*, *B*, *C*.

Cambio del sentido de rotación. — Para invertir el sentido de rotación, basta cruzar dos de los hilos de línea; así se invierte el sentido de rotación del campo creado por el estator y por consiguiente el sentido de rotación del rotor (fig. 372).

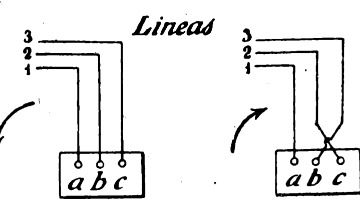


Fig. 372.

Variaciones de velocidad.—En esta clase de motores, la velocidad es casi independiente de la carga: la variación entre el funcionamiento de vacío y plena carga es aproximadamente igual al 3 °/₀ considerando un motor de mediana potencia. La velocidad es prácticamente constante, y su valor ω' está dado por la relación (pág. 267):

$$g = \omega_1 - \omega',$$

siendo g el resbalamiento y ω_1 la velocidad de los campos giratorios. Ahora bien, se sabe que $\omega_1 = \frac{\omega}{p}$, siendo ω la pulsación de la corriente de alimentación ($\omega = 2\pi N$, N es la frecuencia de las corrientes) y p el número de campos polares. Por consiguiente:

$$g = \frac{\omega}{p} - \omega', \quad \text{de donde:} \quad \omega' = \frac{\omega}{p} - g.$$

Se puede variar la velocidad ω' del motor haciendo variar una de las cantidades: g (resbalamiento), ω (pulsación) y por consiguiente N, frecuencia de las corrientes, y p, número de campos polares.

Pero el par motor tiene por valor (pág. 268):

$$C = \frac{m}{4} \frac{Rg\Phi_0^2}{R^2 + \mathcal{L}^2 g^2}$$

Por consiguiente, para un par dado, g tiene un

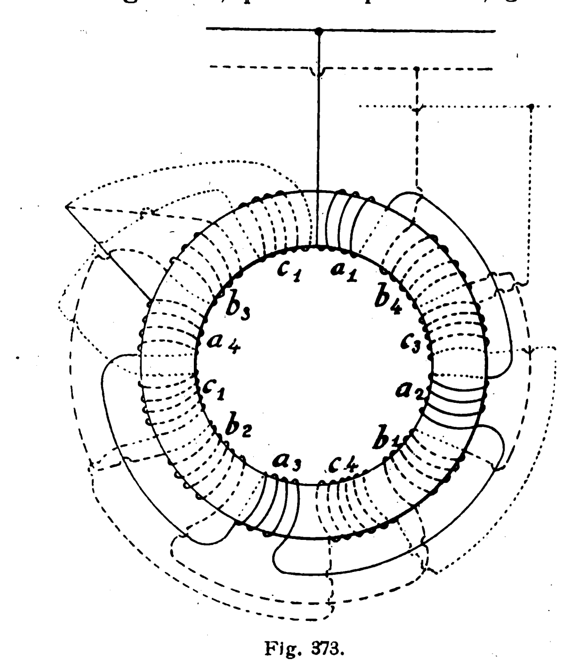


Fig. 373.

valor invariable, por ser R y $\mathcal{L}$ constantes y lo mismo m y Φ_0. Luego únicamente pueden variar N y p; pero si el motor está alimentado por una central, la frecuencia N de la corriente se mantiene constante, y solamente puede modificarse la velocidad variando el número p de campos polares.

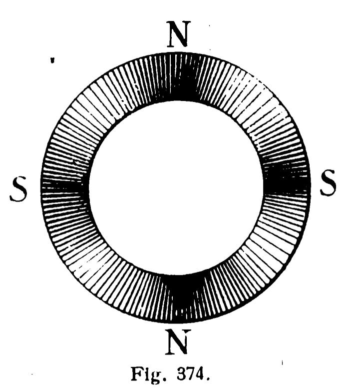


Fig. 374.

Este procedimiento conduce a una complicación considerable de construc-

ción; por esta razón, en la práctica sólo se construyen motores de dos velocidades; por medio de un conmuta-

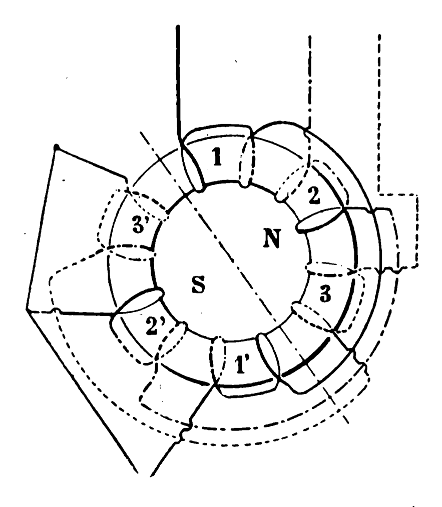


Fig. 375.

dor especial, se duplica el número de campos polares, con lo cual se reduce la velocidad a la mitad. Las figuras 373 y 375 representan las conexiones realizadas entre los carretes inductores para obtener cuatro o dos campos polares (figs. 374 y 376).

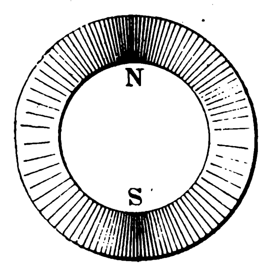


Fig. 376.

Para duplicar el número de polos giratorios, se pueden fijar sobre la armazón dos devanados distintos, uno que da p campos y el otro $2p$; bastará entonces un inversor para obtener las dos velocidades (fig. 377). También se pueden unir los extremos de los carretes inductores con los contactos de un combinador, que sirve para

unir entre sí los carretes, como en el esquema de la figura 373, o de la 375.

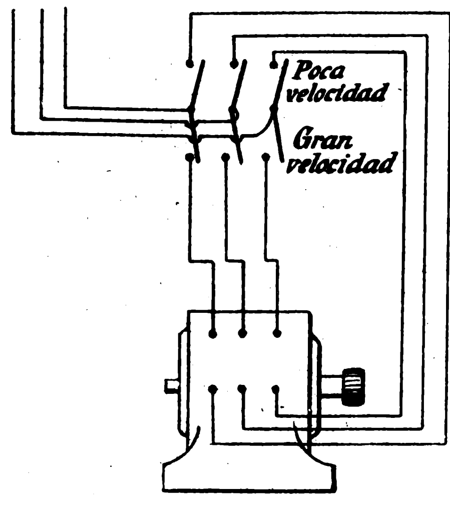


Fig. 377.

Motores sistema Boucherot. — Los motores Boucherot, construídos por la casa Bréguet, son motores con inducido de jaula de ardilla y por consiguiente muy fuertes, que, gracias a un ingenioso dispositivo, tienen un gran par al arrancar, pudiendo por lo tanto arrancar en carga (cerrando simplemente un interruptor) con una intensidad proporcional al par resistente.

El rotor está formado de dos partes dispuestas de tal modo que, al arrancar, las fuerzas electromotrices inducidas en ellas se encuentran en oposición: el efecto es el mismo que si se tuviera una sola jaula de ardilla en cuyos conductores se hubieran introducido resistencias. En marcha normal, al contrario, las fuerzas electromotrices se suman y todo ocurre como si se hubiesen suprimido las resistencias.

Estos motores, según las aplicaciones a que se des-

tinan, se construyen de tres clases, que se designan con los nombres de: tipo α, tipo β y tipo γ.

Tipo Alfa. — El rotor tiene dos núcleos A_1 A_2, montados en el mismo árbol y en cuyas ranuras van los conductores de una jaula de ardilla. Los conductores están unidos por fuera mediante anillos poco resistentes F_1 y F_2, y en la parte comprendida entre los dos núcleos están unidos por puentes de maillechort R de resistencia conveniente calculada de antemano (figuras 378 y 379).

Fig. 378.

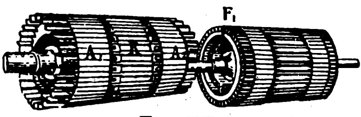


Fig. 379.

El estator también está formado por dos sistemas de circuitos montados cada uno sobre una armadura de láminas delgadas de hierro extradulce, perforadas y encerradas en una caja o armazón de fundición (figura 380). Una de estas partes es fija, mientras que la otra, llamada estator movible o *defasable,* puede girar en el interior, mediante una palanca o un tornillo, por un volante accionado directamente. Los devanados de cada uno de los estatores son los de un inductor polifásico, y los dos estatores están unidos

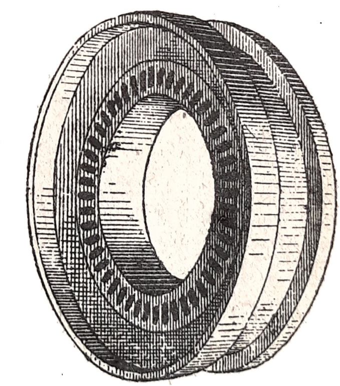


Fig. 380.

entre sí en serie, o en paralelo, por medio de cables flexibles.

Los dos estatores están dispuestos, uno respecto a otro, cuando no funciona el motor, de manera que los devanados de uno de ellos estén desviados respecto a los devanados del otro en el espacio angular correspondiente a un semiperíodo, es decir, en el ángulo que separa dos polos norte y sur consecutivos. Cuando se cierra el interruptor, las fuerzas electromotrices inducidas en los dos rotores están en oposición: los devanados están montados en paralelo y cerrados sobre las resistencias de maillechort *R*. Estas resistencias están calculadas de modo que al arrancar se cumple la condición $R = \mathcal{L} \times g$ (pág. 269).

Cuando se pone en movimiento el inducido, se hace girar poco a poco el estator defasable de manera que disminuya el ángulo de los campos creados por los dos devanados, poniéndose así en concordancia de fase las fuerzas electromotrices, no pasando entonces ninguna corriente por las resistencias *R*.

La puesta en marcha del motor se hace mediante un interruptor y la palanca o el volante que rige la parte defasable.

Se gobierna generalmente este tipo de motor por medio de un aparato de arranque representado esquemáticamente en la figura 381, el cual, por un mecanismo de sujeción, impide el cierre del circuito si el rotor defasable no se encuentra en la posición de arranque.

Funcionamiento: El contacto *D* se establece solamente cuando el estator defasable se encuentra en la posición de arranque ya indicada; en caso contrario, el circuito del carrete *C* está cortado y por estar sujeto el disyuntor *A*, no puede cerrarse el circuito. Si se lleva el estator defasable a la posición de arranque,

se establece el contacto *D*, una corriente excita el carrete *C*, el disyuntor se suelta, el circuito puede cerrarse y el motor arranca. Se hace girar a continua-

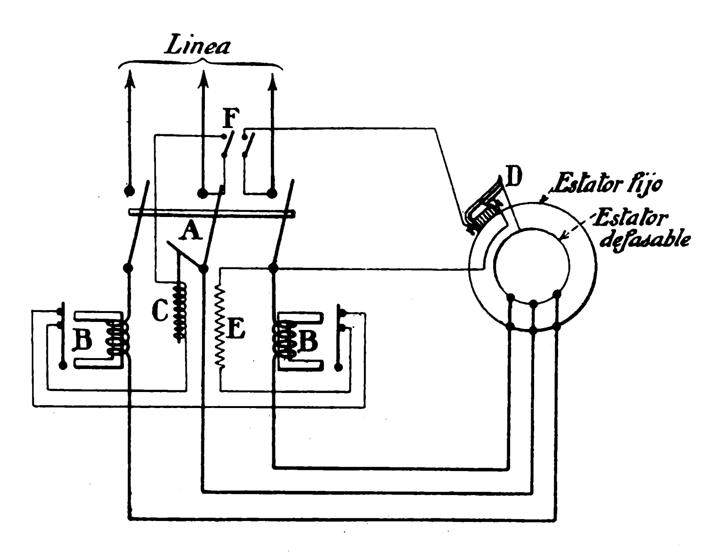


Fig. 381.

ción el estator defasable y aunque el contacto *D*. queda suprimido, la corriente pasa directamente a *C* por las láminas *A*.

Si la corriente en el motor toma un valor demasiado grande, las armaduras de los carretes *B* son atraídas, la corriente queda cortada en *C* y el disyuntor *A* funciona y queda sujeto hasta que vuelve a establecerse el contacto *D* al llevar el estator defasable a su posición de arranque.

Tipo Beta. — Este tipo se emplea en los casos en que el motor no está al alcance de la mano; sobre todo es muy adecuado para accionar a distancia aparatos

que presentan un par de arranque tan grande como el par normal o inferior al mismo.

El desvío de uno de los campos giratorios inducto-

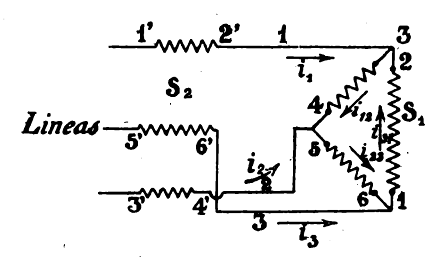


Fig. 382.

res respecto al otro se obtiene, no por un procedimiento mecánico, sino por una conmutación conveniente de las corrientes en los devanados de los estatores.

Los dos estatores son fijos y los extremos de sus

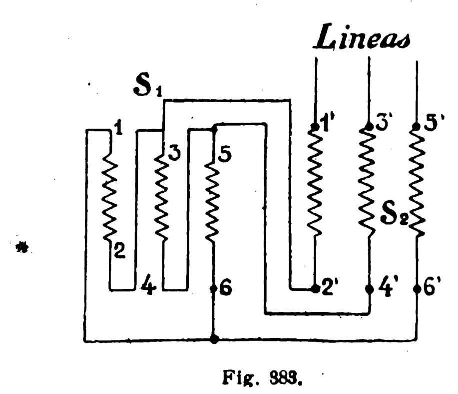


Fig. 383.

devanados están unidos a los contactos de un conmutador o de un combinador. Las conexiones dependen de la magnitud que debe tener el par al arrancar respecto al par normal.

Supongamos, por ejemplo, que el par resistente sea débil al arrancar e igual aproximadamente a la cuarta parte del par normal en carga; en este caso bastará desviar muy poco entre sí los dos campos inductores. Para ello se montan los tres devanados de uno de los estatores en serie con los devanados del otro, montados en triángulo: las corrientes en los dos estatores

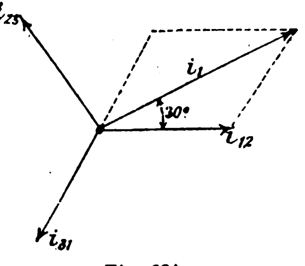


Fig. 384.

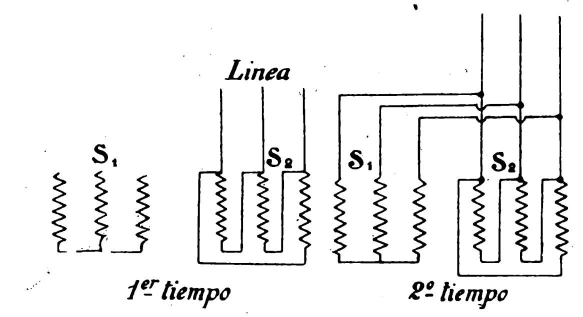


Fig. 385.

están defasadas 30° una respecto a otra, y lo mismo los campos giratorios creados (figuras 382 a 384).

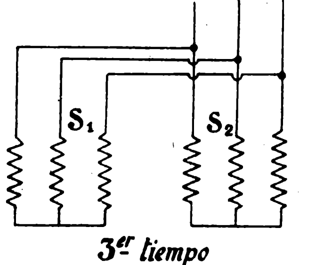


Fig. 386.

Si se quiere tener al arrancar un par grande y decreciente, se hace el arranque en tres tiempos:

1.er tiempo: se alimenta un solo estator, montado en triángulo (fig. 385);

2.º tiempo: se alimenta el segundo estator montado en estrella, y estando el

primero en triángulo, los dos campos estarán defasados 30° (fig. 385);

3.er tiempo: los dos estatores están en estrella y los dos campos inductores estarán en fase (386).

Tipo Gamma. — En este tipo de motor no hay más que un solo inductor con devanados que producen un campo giratorio. El inducido está formado de una sola armazón que lleva dos jaulas de ardilla concéntricas C_1, C_2 (fig. 387).

Las barras de la primera C_1 están colocadas en los agujeros practicados muy cerca del borde de las lámi-

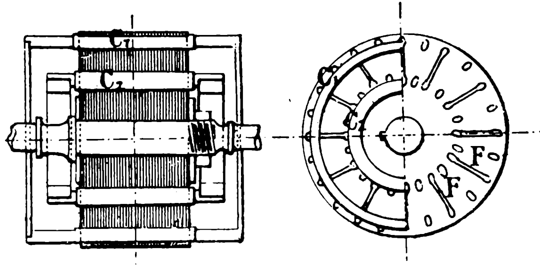


Fig. 387.

nas, de modo que hacen que este inducido tenga un coeficiente de autoinducción muy pequeño $\mathcal{L}_1$, siendo la resistencia R_1 de las barras relativamente grande.

La segunda jaula está compuesta de elementos de poca resistencia R_2, teniendo en cambio un gran coeficiente de autoinducción $\mathcal{L}_2$, por estar las barras hacia el centro del cilindro de láminas, a bastante distancia del borde.

Al arrancar, el resbalamiento es máximo e igual a la pulsación ω de las corrientes en los circuitos inductores: el producto $\mathcal{L}_1 \times g$ es por consiguiente bastante grande, y se calculan los elementos de modo que se tenga aproximadamente:

$$R_1 = \mathcal{L}_1 \times \omega$$

El par producido por esta jaula es por lo tanto considerable al arrancar. Al contrario, $\mathcal{L}_2 \times \omega$ tiene un valor muy elevado, por ser $\mathcal{L}_2$ y ω muy grandes, y como R_2 es pequeño, se tiene:

$$R_2 < \mathcal{L}_2 \omega.$$

El par producido al arrancar, por esta jaula, es pequeño.

Cuando ya se ha hecho el arranque, el resbalamiento disminuye, y se tiene:

$$R_1 > \mathcal{L}_1 g;$$

el par producido por la jaula C_1 es pequeño, en cambio $\mathcal{L}_2\, g$ ha tomado un valor bastante menor que $\mathcal{L}_2 \omega$ y se aproxima a R_2. Los elementos se calculan de modo que en marcha normal se tenga: $R_2 = \mathcal{L}_2 \times g$. El par ejercido por la jaula C_2 es máximo.

De todo esto resulta que la puesta en marcha se efectuará cerrando simplemente un interruptor. Este tipo de motor se presta por lo tanto muy bien a la transmisión a distancia; se emplea sobre todo para las grúas, puentes giratorios, tornos, etc.

B. Motores de rotor devanado

El rotor de este tipo de motor está devanado de manera que dé el mismo número de polos que el estator. Los extremos de los carretes inducidos están unidos a las resistencias de un reostato de arranque y estas resistencias se ponen en cortocircuito en cuanto el motor alcanza su velocidad (figs. 388 a 390).

Motores de resistencias giratorias. — Las resistencias de arranque están dentro del motor y arrastradas

por el rotor en su movimiento de rotación. Cuando

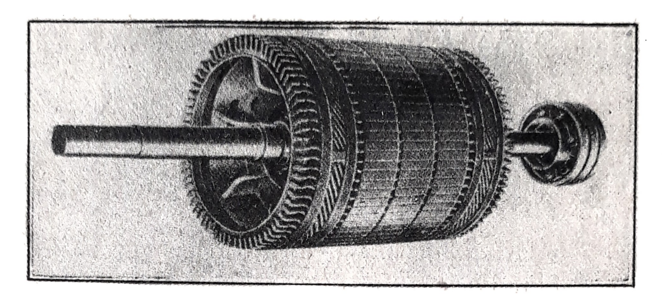


Fig. 388.

éste está parado, dichas resistencias están en serie con

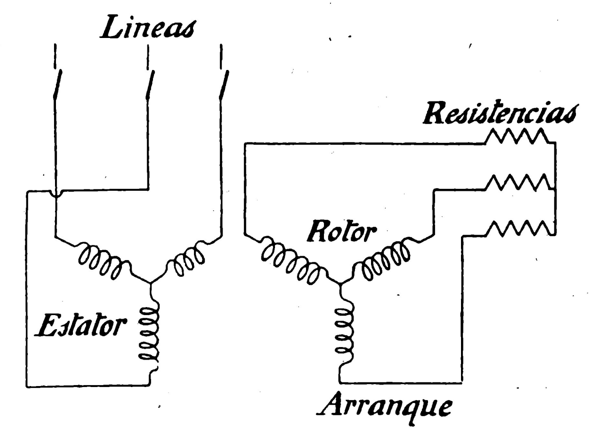


Fig. 389.

los devanados del rotor, y cuando el motor alcanza su velocidad normal, un aparato de fuerza centrífuga las pone en cortocircuito.

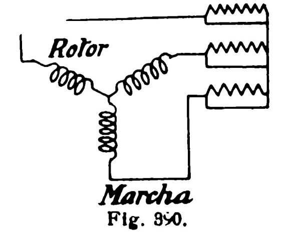


Fig. 390.

La puesta en serie y en cortocircuito se hace a veces mediante un botón colocado en el extremo del árbol. Al arrancar,

el botón debe estar completamente fuera; después del arranque, basta empujar el botón para poner las resistencias en cortocircuito.

Motores con anillas (resistencias exteriores). — Los extremos de los devanados del inducido están unidos a tres anillas aisladas fijas sobre el árbol; mediante esco-

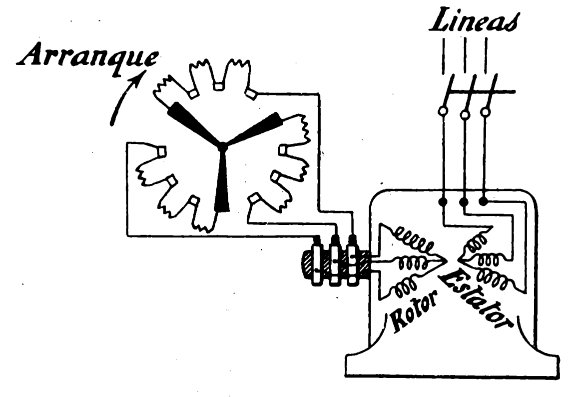


Fig. 391.

billas se unen los devanados con las resistencias cada vez menores (hasta llegar al cortocircuito) de un reostato (fig. 391).

Motores de anillas con dispositivo de puesta en cortocircuito del reostato y elevación simultánea de las escobillas. — Cuando el motor está en marcha, las escobillas no frotan con las anillas más que para mantener en cortocircuito las resistencias del reostato. Para evitar el frotamiento se coloca ordinariamente una palanca que pone en cortocircuito las anillas y al mismo tiempo levanta las escobillas (fig 392).

Observación. — Un mismo motor puede funcionar

bajo dos voltajes diferentes; por ejemplo 110 y 220 volts. Para ello sirven unos bornes en que terminan los devanados del estator y con los cuales se pueden montar

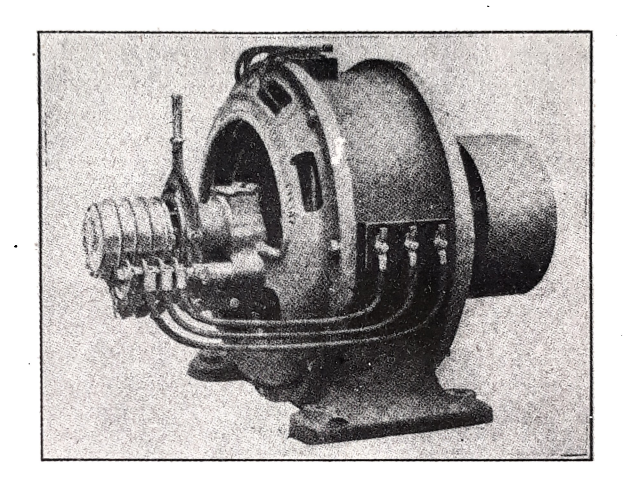


Fig 392.

éstos en estrella o en triángulo, como hemos visto para los motores de inducido en cortocircuito (pág. 272).

Cambio del sentido de rotación. — Este cambio se obtiene cruzando dos hilos de línea (pág. 279).

EJEMPLO. — *Regulación de un motor trifásico por un controller con cambio de sentido de rotación.* — En el esquema de la figura 393, que representa el montaje, la parte inferior *E* permite unir las líneas con los bornes del estator, y se ve que haciendo girar el cilindro en un sentido o en otro, se invierten las conexiones de las líneas 1 y 2 con los bornes del estator, sin cambiar la de la línea 3. Se cambia, por lo tanto, el sentido de rotación de los campos inductores, y, por consiguiente, el del motor.

La parte *R* tiene por objeto ir poniendo en cortocircuito poco a poco las resistencias del reostato de arranque, cualquiera que sea el sentido de rotación. Para darse cuenta del funcionamiento del controller

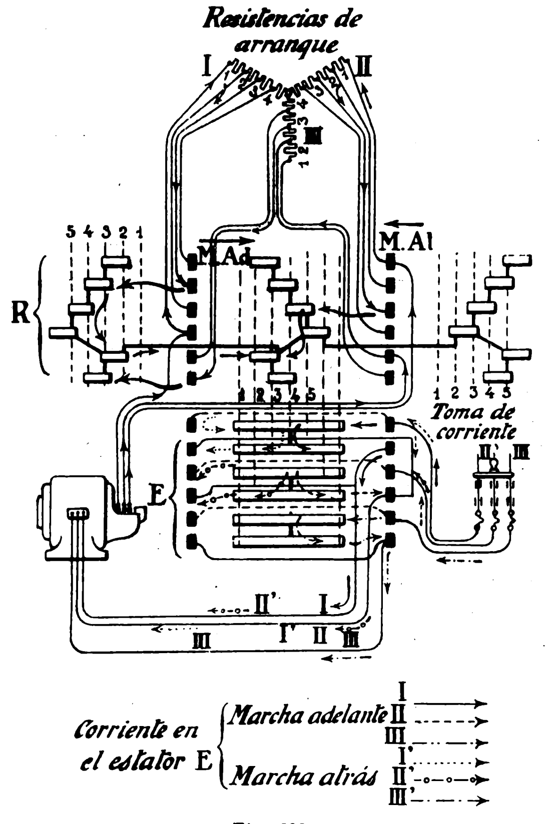


Fig. 393.

basta suponer que el conjunto de sectores se mueve hacia la derecha (marcha adelante) o hacia la izquierda (marcha atrás), permaneciendo fijas las partes unidas a las resistencias.

Las flechas indican que cuando el volante ha recorrido tres contactos o dientes, no hay más que las resistencias 1 y 2 del reostato en serie con cada una de las tres fases del rotor.

Disyuntor automático de voltaje máximo y voltaje cero. — Este disyuntor, montado en el cuadro de maniobra del motor, tiene por objeto:

1.° Impedir el establecimiento de las corrientes en el estator si las resistencias del reostato no están todas en serie con los devanados del rotor;

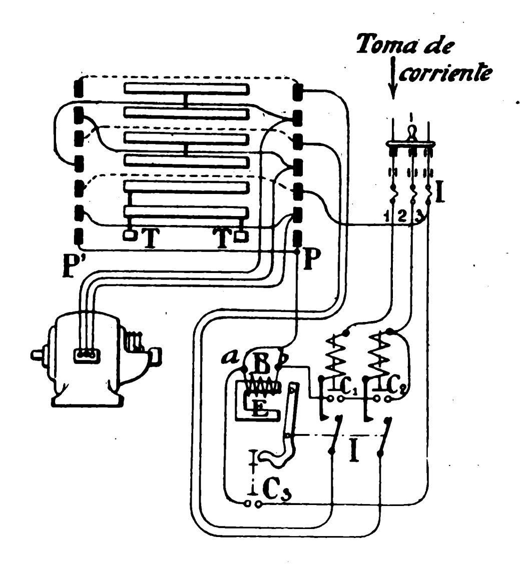


Fig. 394.

2.° Cortar el circuito en cuanto la corriente en el estator alcanza una intensidad superior a un valor determinado.

Hay varios tipos de estos aparatos; damos como ejemplo el disyuntor construído por la compañía Thomson-

Houston, que basta para poder comprender el funcionamiento de cualquier otro tipo (fig. 394).

Estando parado el motor y mientras la corriente en las líneas no excede del valor máximo dado, los contactos C_1 y C_2 están abatidos y el carrete *B*, de hilo fino, del electroimán *E* está unido por una parte a los topes *P* y *P'*, y por otra parte a la línea 2. El interruptor bipolar *I'*, accionado por la armadura del electroimán *E*, se abre al mismo tiempo que el contacto C_3 corta el conductor que une el borne *a* del carrete *B* a la línea 3.

Para arrancar, se cierra el interruptor tripolar *I*, y no pasa corriente por el estator; se hace girar el cilindro del controller en un diente en uno u otro sentido (adelante o atrás), lo cual pone en contacto los sectores y una de las dos teclas *T* o *T'* con los dedos fijos. El borne *a* del carrete *B* está unido a la línea 3 por el tope *P* o *P'*, la tecla *T* o *T'* y los dos sectores a que éstas están unidas.

Variaciones de velocidad. — 1.° *Mediante un reostato en serie con el rotor.* — Basta que las resistencias del reostato de arranque tengan un diámetro suficiente para permanecer en serie con el rotor durante la marcha.

Este procedimiento tan sencillo tiene el inconveniente de disminuir considerablemente el rendimiento del motor a causa de la energía consumida en el reostato; por consiguiente, no es ventajoso emplearlo sino en el caso de que la reducción de velocidad se produzca durante intervalos muy cortos.

2.° *Mediante la modificación del número de campos polares.* — Esta modificación se efectúa del modo dicho anteriormente (págs. 279 y 280) al tratar de los motores con inducido de jaula de ardilla.

3.° *Mediante el acoplamiento en cascada de dos motores.* — Los árboles de los dos motores están acoplados mediante un manguito; el estator de uno de ellos está alimentado directamente por la red y sus escobillas están unidas al estator del segundo, cuyas escobillas están unidas a los bornes de un reostato de arranque (figura 395).

Los dos motores giran entonces con una velocidad igual a la mitad de la velocidad que adquiriría cada uno

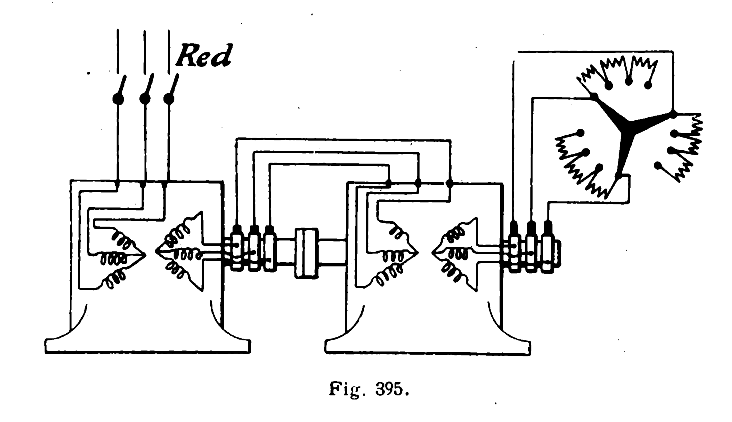


Fig. 395.

de ellos, alimentado separadamente por la red en las mismas condiciones.

En efecto, sea ω la pulsación de la corriente; la velocidad que tomaría cada motor, alimentado directamente, sería, al acercarse al resbalamiento, igual a ω. Sea ω_1 la velocidad que toman los dos motores montados en cascada: se sabe que la frecuencia de la corriente en el rotor del primer motor, alimentado directamente por la red, es $\omega - \omega_1$; el segundo motor cuyo estator está alimentado por esta corriente, adquiere, cuando el reostato llega a estar en cortocircuito, una velocidad que es aproximadamente igual a $\omega - \omega_1$, y como esta

velocidad es ω_1, por estar acoplados los dos motores, se tiene:

$$\omega - \omega_1 = \omega_1,$$

o sea

$$\omega = 2\,\omega_1, \quad \text{de donde} \quad \omega_1 = \frac{\omega}{2}$$

C. Motores con colector

Se ve, según lo expuesto, que para obtener una variación apreciable de velocidad en un motor de inducción, hay que conformarse con un pequeño rendimiento para las pequeñas velocidades, o admitir una cierta complicación empleando varios motores.

Se ha procurado realizar, mediante el empleo de un colector, motores que permitan obtener, en condiciones convenientes de rendimiento, variaciones progresivas de velocidad.

Principio de los motores polifásicos con colector.— Consideremos una máquina cuyo estator *E* sea idéntico al de los motores de inducción, trifásico por ejemplo, y que produzcan un campo constante en magnitud y giratorio con velocidad angular ω, siendo ω la pulsación de la corriente de alimentación. El rotor *R* es un inducido de corriente continua sobre cuyo colector se apoyan tres escobillas, desviadas 120° unas de otras (figura 397).

Supongamos que el inducido gira con una velocidad cualquiera ω'; entre las dos escobillas se produce una fuerza electromotriz de pulsación ω.

En efecto, imaginemos que el campo inductor sea fijo y que el rotor gire con la velocidad $\omega - \omega'$; la velocidad relativa de las espiras inducidas y del campo inductor permanece la misma y las fuerzas electromo-

trices inducidas en las espiras del rotor no cambian ni en magnitud ni en frecuencia.

Para que la velocidad de estas espiras bajo las escobillas sea también la misma, ω', es preciso que estas escobillas giren en el mismo sentido con la velocidad ω,

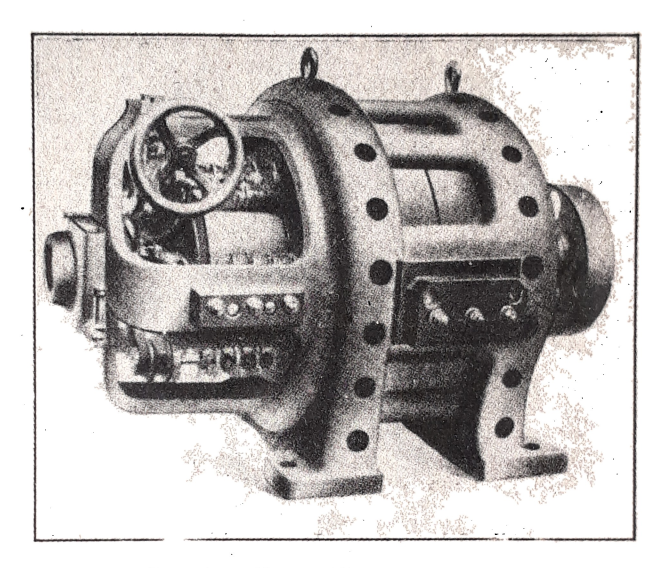


Fig. 396. — Motor trifásico con colector.

porque la velocidad relativa de las espiras y de las escobillas es entonces:

$$\omega - (\omega - \omega') = \omega'.$$

De esta manera sucede lo mismo que si estando fijo el campo inductor, el rotor girase con la velocidad $\omega - \omega'$, y las escobillas, en el mismo sentido, con la velocidad ω (fig. 397).

En estas condiciones, el campo inductor es fijo en el espacio y en las espiras del rotor se produce una fuerza electromotriz de pulsación $\omega - \omega'$.

La fuerza electromotriz entre dos escobillas es evidentemente máxima en el momento en que el punto medio de las espiras comprendidas entre ellas pasa por la línea fija de los polos del campo inductor, y no vuelve a adquirir dicho valor hasta después de una vuelta completa (figura 398). El intervalo de tiempo transcurrido entre dos pasos por el máximo de esta fuerza electromotriz es igual, por consiguiente, al período de la corriente inductora y su pulsación es igual a ω.

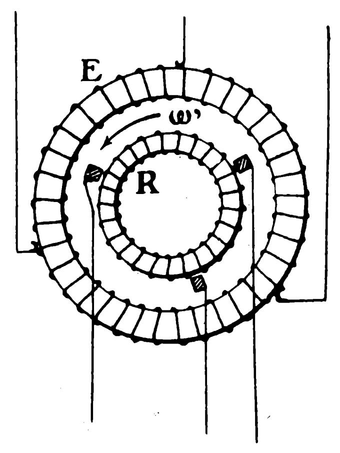


Fig. 397.

Por consiguiente, si se unen las escobillas a circuitos exteriores, éstos serán recorridos por corrientes de pulsación ω, mientras que

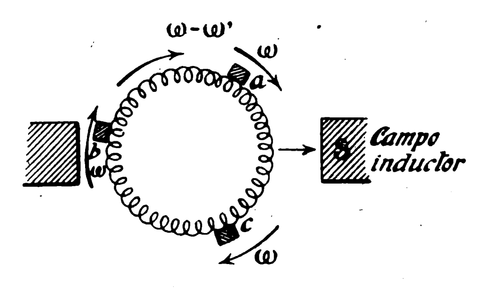


Fig. 398.

por las espiras del rotor circularán corrientes de pulsación $\omega - \omega'$

Así, pues, si se aplica entre las escobillas (que giran con velocidad ω') tensiones de pulsación ω,

resultarán en las espiras del rotor corrientes de pulsación $\omega - \omega'$.

La intensidad de estas corrientes será tanto mayor cuanto más grande sea la diferencia entre la tensión desarrollada y la aplicada.

Además, para una misma tensión aplicada entre las escobillas, la corriente en el rotor depende de la posición de las escobillas sobre el colector. En efecto, supongamos que las escobillas estén colocadas de tal manera que la parte media de la sección comprendida entre dos de ellas esté sobre la línea de los polos inductores en el momento en que la tensión exterior aplicada pase por su máximo, y que la tensión desarrollada esté en oposición con la tensión aplicada; entonces se tiene en el rotor la corriente mínima.

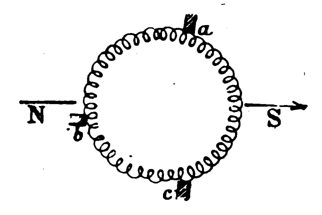


Fig. 399. — Posición de las escobillas, a la cual corresponde la máxima tensión inducida entre *a* y *c*.

Si se desvían las escobillas de esta posición, se aumenta la corriente. Es fácil comprender que si el estator y el rotor están alimentados por el mismo generador, esta posición de las escobillas, que pudiéramos llamar *posición neutra,* se consigue cuando los campos creados por las corrientes en el estator y en el rotor inmóvil, producidas por la tensión aplicada entre las escobillas, están en la misma dirección. En el caso de un estator en triángulo, las escobillas estarían frente a las tomas de corrientes en el estator (fig. 400).

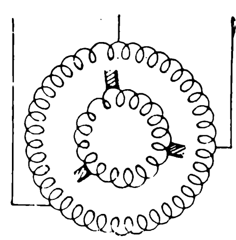


Fig. 400. — Posición neutra de las escobillas.

Con lo expuesto basta para formarse idea del fun-

cionamiento de un motor de esta clase. En efecto, dicho motor obra como un motor ordinario de inducción; el estator produce un campo giratorio de velocidad ω, y el rotor, recorrido por corrientes de pulsación $\omega - \omega'$, gira con la velocidad ω' en la dirección del campo inductor. Se ha visto que para variar la velocidad se ponen en serie con el rotor resistencias que disminuyen la intensidad de las corrientes inducidas. Al mismo resultado se llega, según lo que hemos dicho, poniendo en oposición con el secundario una tensión exterior de la misma pulsación que la del circuito que alimenta al estator. Se hace variar la corriente, bien variando la magnitud de la fuerza electromotriz aplicada, o bien desviando las escobillas.

Por lo tanto, se podrá obtener la velocidad del sincronismo y aun sobrepasarla si se aplica una tensión superior y opuesta a la desarrollada entre las escobillas.

En resumen, este procedimiento consiste en devolver a la red la energía gastada en las resistencias del reostato para la marcha a menor velocidad que la del sincronismo, siendo esto posible por tener la tensión desarrollada entre las escobillas una frecuencia independiente de la velocidad e igual a la de la red.

Cuando marcha el motor a velocidad mayor que la del sincronismo, la red facilita energía no solamente al estator, sino también al rotor.

La tensión de regulación entre las escobillas está dada, en general, por un transformador cuyo devanado secundario está provisto de varias tomas unidas sucesivamente al rotor mediante un acoplador. Esta tensión comunicada al rotor es del mismo orden de magnitud que la caída óhmica en el reostato de resbalamiento en un motor asincrónico ordinario.

La tensión puede también reducirse utilizando el estator devanado en estrella como autotransformador, uniendo las escobillas a puntos de los devanados del estator tomados a distancias convenientes del centro de la estrella (fig. 401).

Para perfeccionar la conmutación y reducir al

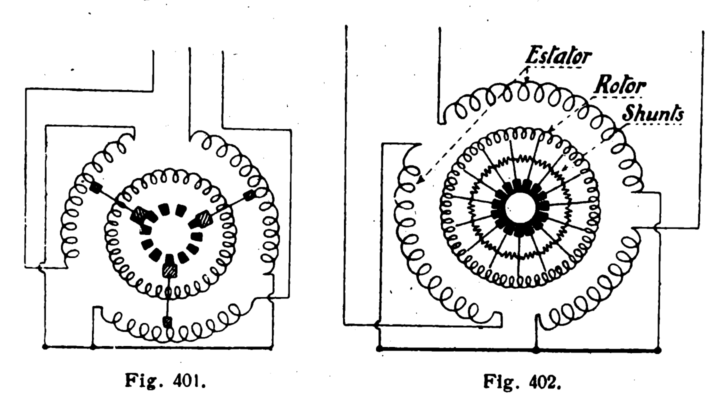


Fig. 401. Fig. 402.

mismo tiempo las dimensiones y el número de láminas del colector, Heyland y Latour unen las láminas del colector con elementos de resistencia suficiente para que las pérdidas de potencia no sean excesivas y que sirven a la vez para que las corrientes wattadas del estator pasen por ellos en lugar de pasar por las escobillas (fig. 402).

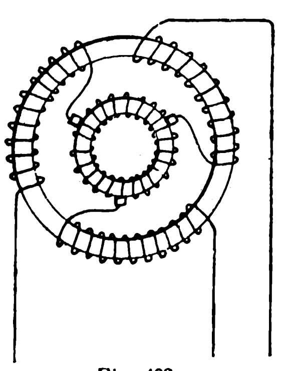


Fig. 403.

Motores de característica serie. — El rotor y el estator están en serie sobre la red (figura 403). Si la tensión es alta, los circuitos del rotor y del estator en serie están alimentados por el secunda-

rio de un transformador cuyo primario está unido directamente a la red (fig. 404).

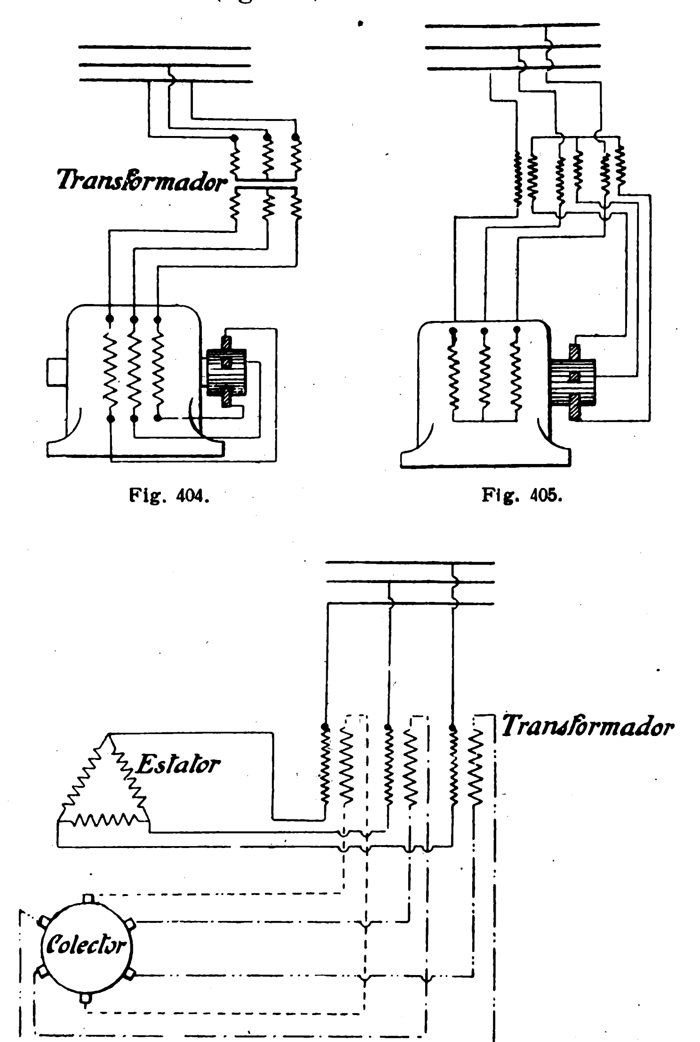


Fig. 404.

Fig. 405.

Fig. 406.

Si la tensión es menor de 500 volts, se alimentan directamente los circuitos del estator por los primarios de un transformador, cuyos secundarios se unen a las escobillas de la máquina (fig. 405).

Pueden disponerse seis escobillas sobre el colector, uniéndolas, como indica el esquema de la figura 406, a los seis extremos de los circuitos del secundario del transformador.

Arranque y regulación de la velocidad. — Para motores de poca potencia, el arranque se efectúa simplemente desviando las escobillas; cuando está parado el motor, estas escobillas están sobre la línea neutra, posición para la cual el par ejercido es nulo; esta posición se obtiene cuando las tensiones aplicadas entre las escobillas están en oposición con las que desarrolla el campo giratorio inductor y son del mismo valor que éstas, no circulando corriente alguna por el rotor. La corriente en el estator es de poca intensidad (del 6 al 7 °/o de la corriente normal), por obrar el estator como el primario de un transformador cuyo secundario está abierto. Se van moviendo poco a poco las escobillas hasta que el motor arranque, en sentido inverso del sentido de rotación del mismo.

Se regula la velocidad variando la desviación de las escobillas. Para que el motor se pare, se empieza por volver las escobillas a la línea neutra; si se siguen moviendo las escobillas en el sentido de la rotación del motor, se frena éste, devolviendo energía a la red.

Para motores de gran potencia y de arranques poco frecuentes, se dispone en el circuito del rotor un reostato, como en el caso de motores de inducción.

Para conseguir grandes variaciones de velocidad, la sociedad Siemens Schuckert construye motores con dos juegos de escobillas, de los que uno permanece fijo y el otro, móvil, se utiliza para la regulación. Estos motores

están montados, intercalando un transformador, como indican los esquemas de las figuras 407 y 408.

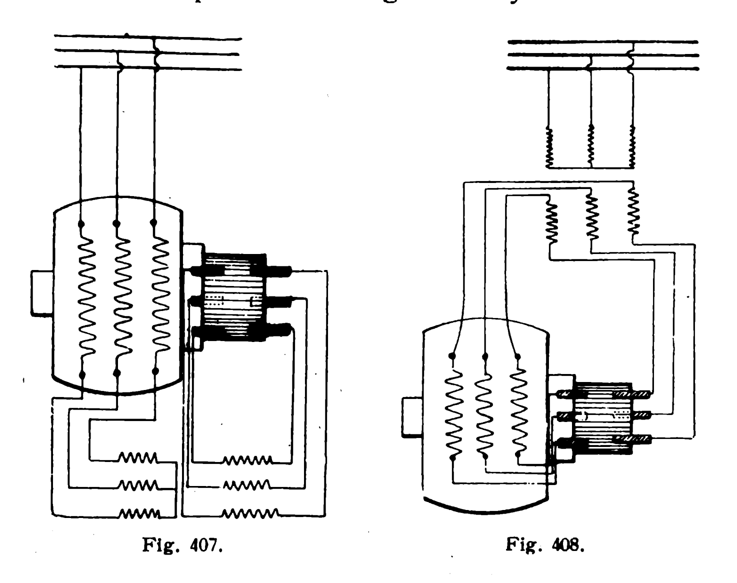


Fig. 407. Fig. 408.

Cambio del sentido de rotación. — Para cambiar el sentido de rotación, se empieza por invertir el sentido de rotación del campo giratorio inductor cruzando dos de los conductores de línea, y se invierte, para arrancar y regular la velocidad, el sentido de la desviación de las escobillas.

Empleo de motores de característica serie con colector. — Estos motores están caracterizados, como los motores serie de corriente continua, por un par potente de arranque y una gran variación de velocidad con el par resistente; también van provistos de interruptor de fuerza centrífuga, que evita que el motor se dispare marchando sin carga.

Estos motores se emplean para las bombas centrífugas, ventiladores, compresores, trenes de laminar,

puentes giratorios, máquinas elevadoras, etc. Son más caros que los motores asincrónicos, pero la pérdida de energía en los arranques y regulación es mucho menor. En plena carga, el rendimiento de un motor serie con colector es un poco menor que el de un motor asincrónico de la misma potencia, pero es mucho mayor para pequeñas velocidades.

Por consiguiente será más ventajoso emplear un motor con colector que un motor asincrónico, cuando haya que obtener velocidades muy diferentes de la normal.

Motores de característica shunt. — El estator y el rotor están unidos a las líneas del modo indicado por

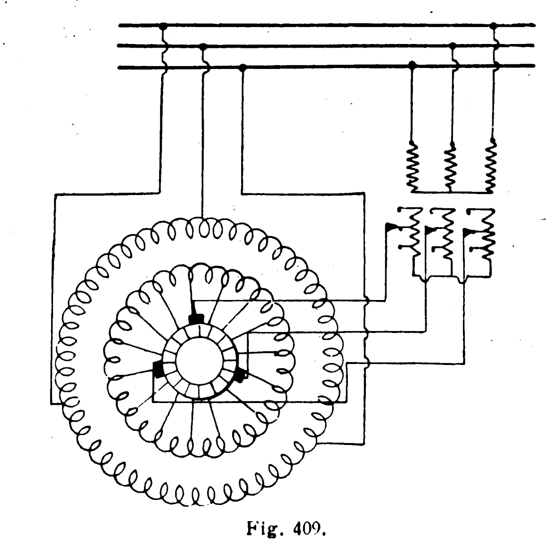


Fig. 409.

el esquema de la figura 409. El estator está alimentado directamente por la red si la tensión no es demasiado alta, y el rotor por intermedio de un transfor-

mador cuyo primario está unido a la red y cuyo secundario, con un número variable de espiras, está unido a las escobillas.

Si la velocidad debe variar poco, se obtiene la regulación desviando las escobillas y manteniendo constante la tensión entre las mismas.

En cambio, si la velocidad ha de sufrir grandes variaciones, se varía la tensión aplicada alterando la relación de transformación del transformador, o bien por medio de un *transformador de voltaje por inducción*.

Este transformador está basado en el principio siguiente:

Sea un circuito C en cuyos bornes se quiere variar la tensión, cuando se dispone de una tensión alterna constante: se pone en serie con este circuito un carrete fijo de hilo grueso B_1 devanado sobre un núcleo de hierro; enfrente se coloca otro carrete de hilo fino B_2, móvil alrededor de un eje O perpendicular al del carrete B_1, y en derivación entre los conductores que alimentan el circuito C (fig. 410). Estos dos carretes obran por inducción uno sobre otro; cuando el plano de las espiras del carrete B_2 es perpendicular al de las espiras de B_1, no hay fuerza electromotriz inducida en B_1 y la tensión entre los bornes M y N de C es la de la red, o sea, U. Si se lleva poco a poco el carrete B_2 frente al B_1, de modo que los planos de las espiras de ambos carretes lleguen a ser paralelos, las líneas de fuerza producidas por B_1 atraviesan el plano de las espiras de B_2, produciéndose en este carrete una fuerza electromotriz que se suma a U, o se resta según el sentido en que se gire B_1; el circuito C

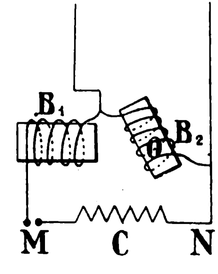


Fig. 410

se encuentra respectivamente sometido a un voltaje excesivo o escaso respecto al normal (fig. 411).

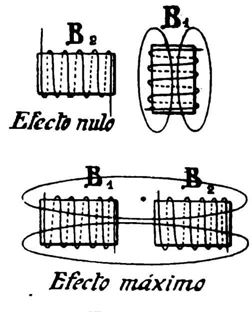


Fig. 411.

Este aparato está constituído en la práctica del modo siguiente:

Los circuitos del carrete inducido están devanados en el interior de un cilindro de láminas de hierro, dentro del cual hay otro cilindro sobre el que están las espiras inductoras de hilo fino; este segundo cilindro es móvil alrededor de su eje y puede girar cierto ángulo alrededor de una posición tomada como origen (fig. 412).

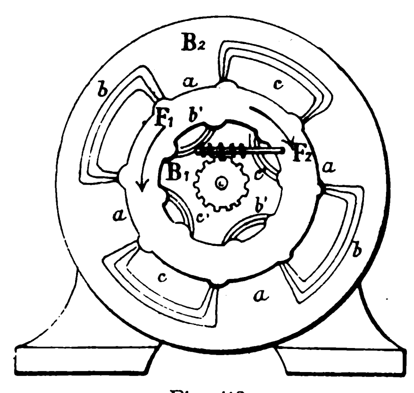


Fig. 412.

Se ve fácilmente que si los planos de las espiras de B_1 están entre las espiras de B_2, frente a las posiciones a, a, no hay aumento ni disminución del voltaje. Si se hace girar B_2 en el sentido F_1, por ejemplo, hasta llevar los planos de los carretes b', b' de B_1 frente a las posiciones b, b, el circuito irá aumentando, por

ejemplo, poco a poco de voltaje; en cambio, si se hace girar el cilindro B_2 en el sentido F_2, hasta llevar los carretes b', b' frente a c, c, irá perdiendo voltaje el circuito.

El movimiento do los carretes se obtiene mediante un volante que lleva un tornillo sin fin, para engranar con un piñón dentado (fig. 413).

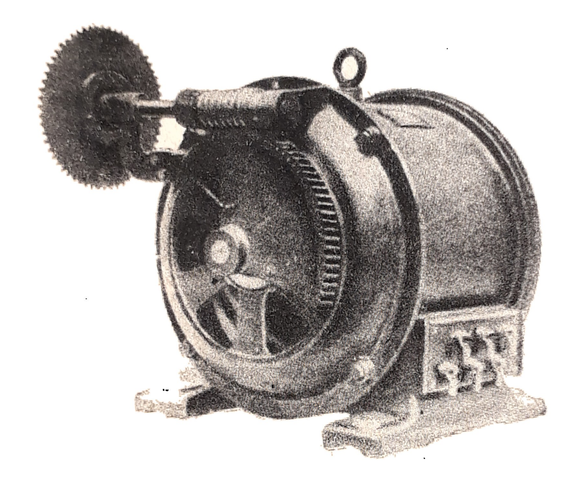


Fig. 413.

Arranque y regulación con transformador para motor trifásico con colector (Sociedad alsaciana). — Los tres cuchillos C_1, C_2, C_3 del interruptor, manejados por el mango *M*, están fijos a un mismo eje; el cuchillo C_2 tiene las mandíbulas un poco más largas que los otros dos (fig. 414).

Cuando está parado el motor, los electroimanes E_1 y E_2 no están excitados, y si el acoplador está en la posición de arranque, el contacto de cierre v está establecido. Cuando se hacen avanzar los cuchillos por medio del mango, se establecen los contactos con el C_2

y pasa una corriente por los dos carretes de los electroimanes E_1 y E_2, por la línea *I*, el contacto de ruptura, el contacto de cierre y la línea *II*; los contactos *b* se establecen porque el núcleo del electroimán E_1

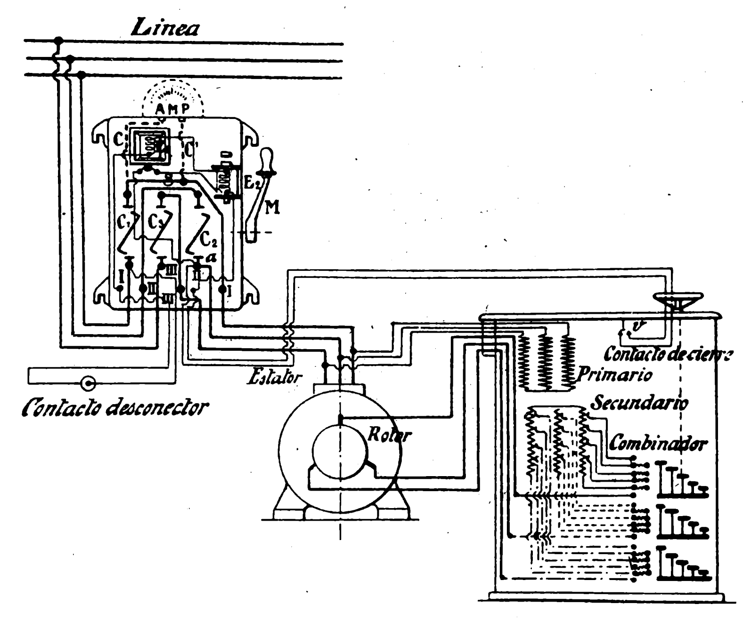


Fig. 414.

es atraído, haciéndose posible mover el mango, y cerrándose los contactos de C_1 y C_3.

Un trinquete regido por E_2 sujeta la manivela *M*, que es de vuelta automática.

Actuando entonces sobre el volante del acoplador (figura 415), se aumenta poco a poco la tensión entre las escobillas, suprimiéndose así el contacto de cierre. La corriente del electroimán E_2 pasa por los contactos *b*, manteniéndose cerrado el interruptor tripolar.

Si la corriente falta o si se abre el contacto de

ruptura, los electroimanes E_1 y E_2 no se excitan, y la manivela vuelve atrás bruscamente, parándose el motor. Entre los extremos del shunt S hay derivado un amperímetro mediante los cordones c y c'.

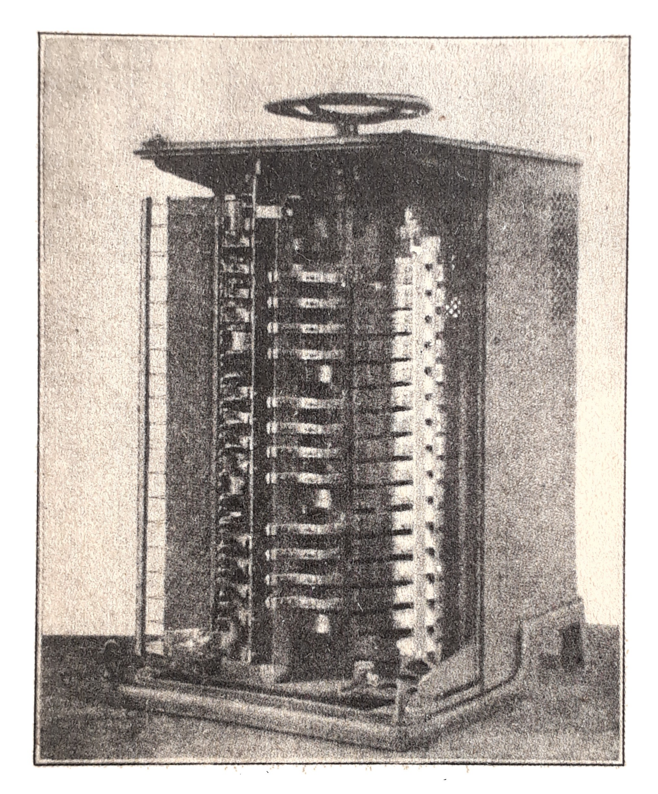


Fig. 415.

Empleo del motor de característica shunt. — El motor con colector, de característica shunt, se emplea ventajosamente en el caso en que la carga pueda reducirse a cero, porque si, en este caso, la velocidad aumenta, no pasa de cierto límite. No sucede lo mismo

con el motor serie, que en cambio tiene la ventaja de ser más barato.

Respecto al motor asincrónico, el motor con colector no es económico más que si la regulación de la velocidad es por lo menos de 10 a 12 °/₀.

Se construyen motores para regulaciones en la relación de 1 a 3 y aun para mayores límites, alcanzando la relación de 1 a 10.

Estos motores se emplean para las máquinas de estampado, máquinas-herramienta, etc.

Se pueden obtener motores de *característica compound* por medio del montaje representado en la figura 416.

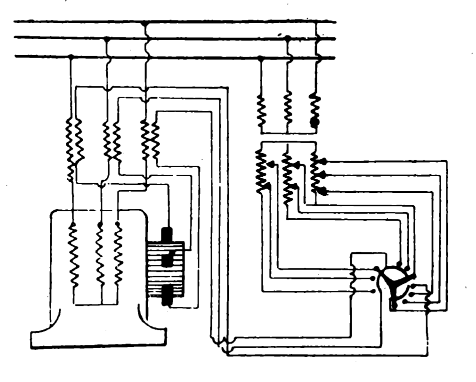


Fig. 416.

Regulación de la velocidad de un motor asincrónico por recuperación de la energía correspondiente al resbalamiento. — Se ha visto anteriormente (pág. 295) que es posible regular la velocidad de un motor asincrónico cerrando el rotor sobre resistencias variables. Pero la energía de resbalamiento que así se pierde en estas resistencias es considerable, quedando con ello muy reducido el rendimiento. Es posible

obtener la regulación recuperando la energía de resbalamiento, ya sea bajo forma mecánica o bajo forma eléctrica.

1.° Recuperación bajo forma mecánica. — El motor principal M_1 está montado sobre el árbol de un motor con colector M_2, según el esquema de la figura 417. La energía de resbalamiento es absorbida por el motor M_2, que suma el par así desarrollado al del motor M_1. Los motores están calculados de tal modo que cuando el motor principal M_1 gira con su velocidad máxima, el motor M_2 no absorbe energía alguna.

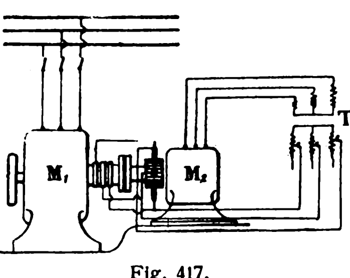


Fig. 417.

Para reducir la velocidad, basta actuar sobre el transformador T de modo que se aumente la fuerza contraelectromotriz desarrollada por el rotor de M_2, disminuyéndose así la corriente en el rotor de M_1, y el efecto es el mismo que si se introdujeran resistencias. La potencia del motor M_2 depende del valor de la reducción de velocidad que se quiera obtener; si esta reducción ha de ser del 25 °/₀, por ejemplo, la potencia de M_1 debe ser también igual al 25 °/₀ aproximadamente de la potencia de M_2.

Puede darse el caso de que sea difícil construir un motor M_2 que gire con la misma velocidad que M_1; entonces se emplea un motor de velocidad adecuada a su potencia y se une al M_1 por medio de un tren de engranajes.

2.° Recuperación bajo forma eléctrica. — Se puede obtener la recuperación de la energía de resbalamiento bajo forma eléctrica por medio de un genera-

dor asincrónico, o por medio de un transformador de frecuencia.

a) *Por un grupo «motor-generador»*. — En este sistema, el motor principal M_1 está unido eléctricamente a un motor con colector M_2, como anteriormente; pero no está acoplado mecánicamente con el mismo (fig. 418). El motor M_2 está acoplado con un generador asincrónico M_3 cuyo estator está unido a la línea, y la energía

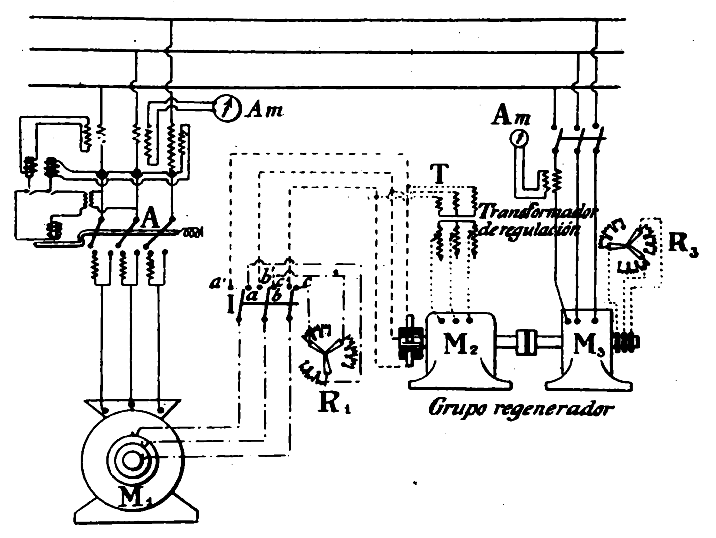


Fig. 418.

de resbalamiento es devuelta a la red. En efecto, se sabe que un generador asincrónico no es más que un motor de inducción, de jaula de ardilla, por ejemplo. M. Leblanc ha demostrado que si se mueve un motor cuyo estator está unido a una red en la que hay tensiones de pulsación ω, con una velocidad ω' superior a ω (máquina bipolar), esta máquina funciona como generador, y da a la red corrientes de pulsación ω.

El esquema de montaje está dado por la figura 418.

Para poner en marcha el motor, se procede del modo siguiente: se hace arrancar la máquina asincrónica M_3 como motor alimentado por la red, por medio del reostato de arranque R_3, y se arranca después el motor principal mediante su reostato de arranque R_1, estando el inversor *I* sobre los topes *a*, *b*, *c*.

Cuando este motor alcanza su velocidad, que corresponde al régimen menor, se lleva el inversor *I* sobre los topes *a'*, *b'*, *c'*, y se regula la velocidad por medio de un transformador *T*.

El interruptor automático *A* corta el circuito de alimentación del motor, ya sea para una corriente excesiva, o para una tensión demasiado pequeña.

b) *Por un transformador de frecuencia.* — Consideremos un inducido de corriente continua con su colector (fig. 419) y sobre el mismo árbol tres anillos unidos a tres puntos de este inducido, tomados a 120° unos de otros. Si se unen tres escobillas, distantes entre sí 120° y apoyándose sobre el colector, con un generador de corrientes trifásicas de pulsación $\omega - \omega'$, se producen en el inducido corrientes que dan lugar a un campo giratorio de velocidad $\omega - \omega'$, tanto si el rotor es fijo como si gira con una velocidad cualquiera. El sentido de rotación de este campo depende, desde luego, de las conexiones entre los hilos de línea y las escobillas.

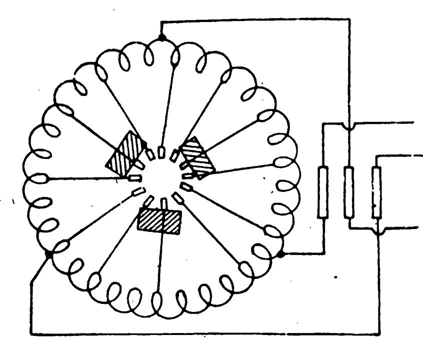


Fig. 419.

Si se hace girar el rotor con la velocidad ω' en sentido inverso del campo, la velocidad relativa de las

espiras del rotor respecto al campo es $\omega - \omega' + \omega' = \omega$ y entre puntos fijos del rotor, en particular entre los tres puntos distantes entre sí 120°, es decir, entre los tres anillos, se producen tensiones de pulsación ω. En efecto, todo sucede como si, estando fijo el campo, girara el rotor con velocidad ω; la tensión máxima entre dos puntos tiene lugar cuando la espira situada en medio de estos dos puntos está en la dirección de este campo y vuelve a tomar el valor máximo después de una vuelta; por consiguiente tiene una pulsación igual a ω.

Un transformador de frecuencia está constituído por una máquina cuyo rotor devanado lleva, por una parte, un colector sobre el cual se apoyan tres escobillas a 120°, y por otra parte tres anillos unidos a tres puntos del inducido, distantes entre sí 120°. Sobre el estator no hay más que un devanado auxiliar cuyo objeto es facilitar la conmutación.

Las escobillas del colector están unidas a los circuitos del rotor del motor de inducción principal, M_1, que gira con velocidad ω'. Se sabe que en las espiras del transformador de frecuencia, M_2, circulan corrientes de frecuencia $\omega - \omega'$ que dan origen a un campo giratorio, de velocidad $\omega - \omega'$. Por consiguiente, si se mueve el inducido de esta máquina con velocidad ω', en sentido inverso del campo giratorio, se desarrollan entre los anillos tensiones trifásicas de pulsación $\omega - \omega' + \omega' = \omega$; por lo tanto, se podrán unir los anillos a las líneas de la red, a la que devolverá la energía de resbalamiento.

Para hacer girar el rotor del transformador de frecuencia con velocidad ω', bastará montarlo sobre el mismo árbol que el motor principal M_1 (fig. 420), o valerse de un pequeño motor auxiliar M_3 de poca potencia, que gire en sincronismo con el motor principal M_1. Esta última condición se obtiene uniendo el rotor a los anillos del motor M_1, con lo cual se mantienen en

el rotor de M_3 corrientes de pulsación $\omega - \omega'$, y como el estator está alimentado por corrientes de pulsación ω,

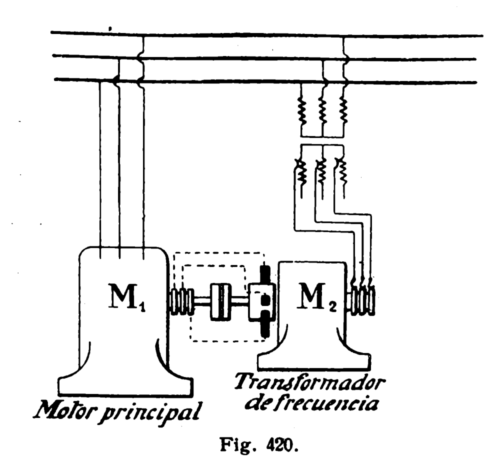


Fig. 420.

la velocidad es ω', si el número de polos es el mismo en M_1 y M_3 (fig. 421).

Es evidente que si el número de polos no fuera el

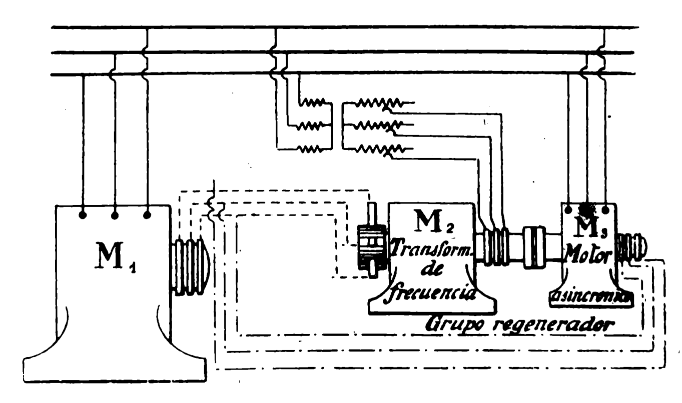


Fig. 421.

mismo, la relación entre las velocidades de M_3 y M_1 sería igual a la relación entre el número de polos.

II. Motores asincrónicos monofásicos

Motor de inducción

El motor de inducción monofásico está construído como un motor polifásico, pero el estator no lleva más que un devanado alimentado por corrientes alternas simples.

El rotor, generalmente trifásico, es de jaula de ardilla, o devanado, estando los extremos de las tres fases unidos a tres anillos, sobre los cuales se apoyan las escobillas.

Se sabe que a los motores que no arrancan por sí mismos, es preciso darles una velocidad inicial suficiente.

Este procedimiento de arranque sólo se aplica a pequeños motores.

Arranque en bifásico. — El procedimiento más em pleado para el arranque consiste en disponer un devanado auxiliar en el estator, alimentado al arrancar por una corriente defasada unos 90º sobre la que recorre el devanado principal.

Estos dos devanados están colocados de manera que los campos que producen tienen direcciones perpendiculares, resultando un campo giratorio y obrando el motor como un motor polifásico, que, por consiguiente, puede arrancar por sí mismo. Cuando se alcanza su velocidad, se suprime la corriente en el devanado auxiliar.

Para obtener en el devanado auxiliar una corriente defasada unos 90º sobre la que recorre el devanado principal, se dispone al arrancar una resistencia en serie con el devanado principal, de modo que la recorra

una corriente aproximadamente en fase con la tensión entre líneas, y en serie con el devanado auxiliar se coloca una autoinducción, de modo que quede recorrida por una corriente aproximadamente en cuadratura con la tensión (fig. 422).

Al arrancar, las láminas del inversor tripolar *I* están sobre los contactos 1′, 2′, 3′; la resistencia está sobre el

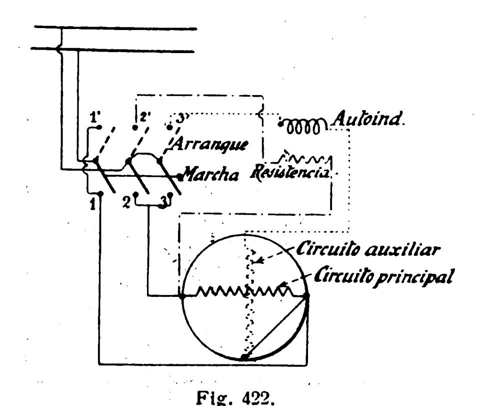


Fig. 422.

devanado principal y el carrete de autoinducción sobre el devanado auxiliar. Cuando ya está el motor en marcha, el inversor se lleva sobre los topes 1, 2, 3 y el devanado principal queda unido directamente a las líneas, no pasando corriente alguna por el devanado auxiliar.

Observación. — Se puede sustituir la autoinducción por un condensador, que desempeñará el mismo papel.

En el caso de motores de potencia media y de gran potencia, el inducido está devanado y se hace el arranque con todas las resistencias en serie con el inducido, poniendo después poco a poco las resistencias en cortocircuito.

En la figura 423 se indica el esquema de un reostato de arranque para motor asincrónico, construído por la sociedad francesa «L'Éclairage électrique». Al arrancar,

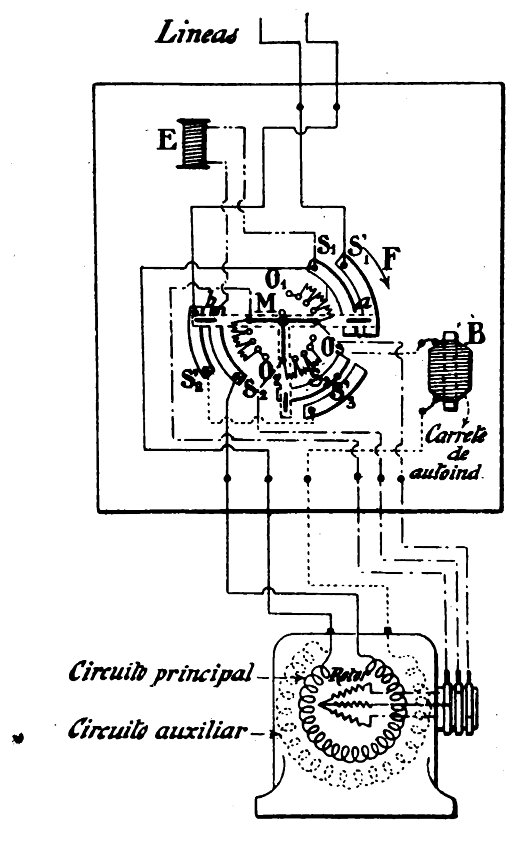


Fig. 423.

la manivela M une los contactos O_1, O_2, O_3 con el eje O y las resistencias están todas en serie, por los anillos, con los devanados del rotor. Los conductores a y b, rígidamente unidos a la manivela, de la que están eléc-

tricamente aislados, no se apoyan más que sobre los sectores S_1 y S_2, no pasando corriente alguna al estator. Cuando se mueve la manivela en el sentido de la flecha F, pasa la corriente a los dos devanados, principal y secundario, y se van poniendo en cortocircuito poco a poco las resistencias de arranque. Cuando la manivela llega a la posición de marcha (que es la indicada en la figura 423), el conductor C no une ya los sectores S_3 y S'_3, quedando cortada la corriente en el devanado auxiliar. La cuadratura de los campos se obtiene mediante una sola bobina de self en el circuito auxiliar.

El reostato de arranque puede estar provisto de un dispositivo de escape para el caso de sobrecarga o de interrupción de la corriente en las líneas. Cuando la tensión entre las líneas es suficiente, el electroimán E atrae

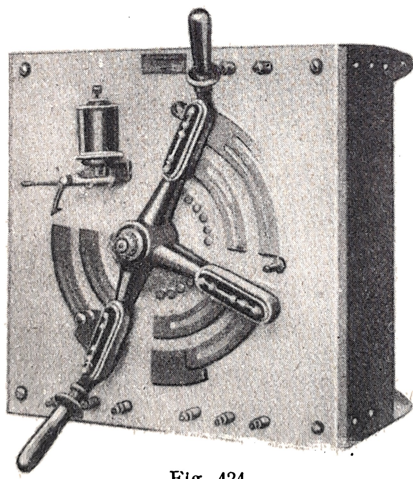


Fig. 424.

su armadura, la cual, por medio de un gancho, sujeta la manivela en la posición de marcha. En cuanto baja la tensión, un muelle vuelve a establecer los contactos en la posición de arranque (fig. 424).

Lo mismo que para las corrientes polifásicas, se construyen motores que pueden utilizarse con dos voltajes diferentes, por ejemplo, con 110 o con 220 volts. Los devanados del estator, principal y auxiliar, se dividen en dos partes cada uno; estas dos partes pueden agruparse en serie para la tensión más alta, y en paralelo para la más baja.

En este caso, el motor tiene ocho bornes. El montaje está indicado en los esquemas de las figs. 425 y 426.

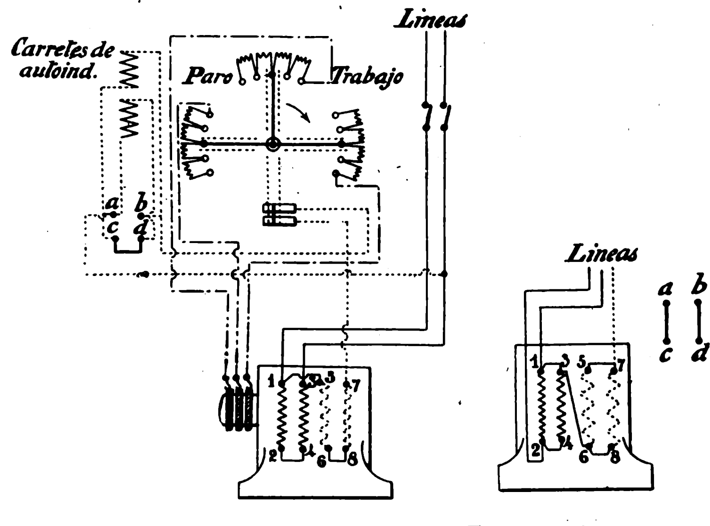


Fig. 425. — Con 220 volts; montaje serie.

Fig. 426. — Con 110 volts; montaje paralelo.

En el montaje de la figura 427 (cuadro de la Sociedad alsaciana), se cierra primero el interruptor bipolar *I*, pasando la corriente al devanado principal *P* del estator por la resistencia *R*, y al devanado auxiliar *A* por el carrete de autoinducción *S*. Se cierra después el interruptor monopolar *I'*, con lo cual se pone *R* en cortocircuito y se suprime la corriente en el devanado auxiliar.

Se puede regular un motor monofásico por un *controller,* como indica la figura 428.

Se ve fácilmente que cuando el cilindro móvil ha girado en el sentido de la flecha *F*, de modo que las

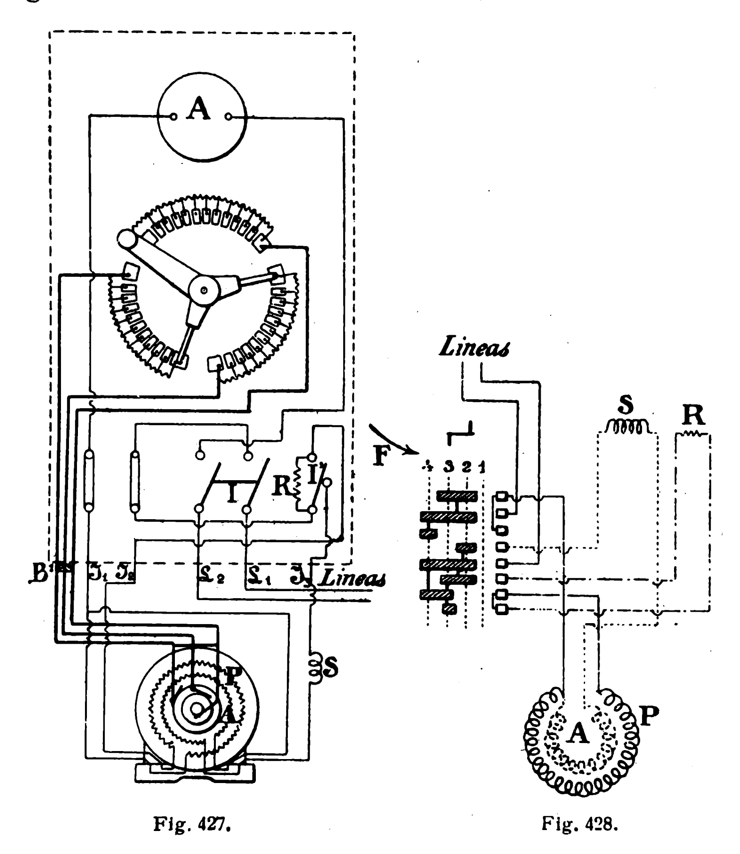


Fig. 427. Fig. 428.

escobillas fijas se coloquen sobre los sectores móviles en la posición 2, el devanado principal *P* del estator está cerrado sobre las líneas a través de la resistencia *R*, mientras que el devanado auxiliar está cerrado por el carrete de autoinducción *S*. En las posiciones 3

y 4, el circuito auxiliar está cortado y la resistencia *R* está en cortocircuito.

Motores con colector

A. **Motor serie compensado.** — Se sabe que si el sentido de la corriente cambia al mismo tiempo en el inducido y en el inductor de un motor de corriente continua, el sentido del par motor permanece invariable. Por consiguiente, se puede alimentar un motor de corriente continua con corrientes alternas.

Es evidente que para evitar una pérdida considerable de energía por las corrientes de Foucault, deberá laminarse todo el circuito magnético, reduciéndolo a hojas muy delgadas y aisladas entre sí. Además, a causa de la reactancia de los circuitos inductor e inducido, la corriente absorbida, para una misma tensión aplicada, será menor que con corriente continua, y el factor de potencia será muy pequeño. Por último, las fuerzas electromotrices alternas que se producen en las espiras del inducido dificultan mucho la conmutación, produciéndose chispas considerables en las escobillas.

De aquí se deduce que, a igualdad de potencia útil, las dimensiones, las particularidades de construcción, etc., suponen un precio mucho mayor para los motores de corrientes alternas que para los de corriente continua.

Los motores shunt tienen respecto a los motores serie el inconveniente de que el defasaje de la corriente en el circuito inductor sobre la tensión aplicada es mayor (a causa de la gran autoinducción del circuito inductor) que el defasaje de la corriente en el inducido. Los cambios de sentido de estas dos corrientes no se

verifican, por lo tanto, al mismo tiempo y el funcionamiento deja mucho que desear.

En los motores serie sucede lo contrario, pues siendo la corriente la misma en los dos circuitos, inducido e inductor, los cambios de sentido de las corrientes se verifican simultáneamente. Sin embargo, la conmutación es siempre defectuosa, y se producen muchas chispas en las escobillas.

Se salva este grave inconveniente por medio de un devanado suplementario sobre el circuito magnético, llamado *devanado compensador*. Un motor provisto de este devanado se llama *motor compensado*.

Si se considera una espira del inducido, se ve que se produce en la misma una fuerza electromotriz que es la resultante de dos fuerzas electromotrices inducidas. La primera es debida al movimiento de la espira en el campo inductor, y está en fase con el flujo inductor; alcanza su valor máximo cuando la espira se encuentra bajo los polos, y cero cuando está en la línea neutra, según se dijo al tratar de las máquinas de corriente continua; por último, es proporcional a la velocidad angular del inducido e independiente de la frecuencia de la corriente de alimentación. Esta fuerza electromotriz es la *componente dinámica*. La segunda fuerza electromotriz, o *componente estática,* es producida por las variaciones a través de la superficie de las espiras del flujo inductor, estando, por lo tanto, en cuadratura con el flujo, y será máxima cuando la espira esté sobre la línea neutra, y nula cuando pase bajo los polos; su valor es independiente de la velocidad del inducido y no depende más que de la frecuencia de la corriente de alimentación.

Al contrario, entre las escobillas, la fuerza electromotriz producida en las espiras inducidas es la resultante de una componente dinámica, que es máxima

cuando las escobillas están sobre la línea neutra, y de una componente estática, nula cuando las escobillas están sobre la línea neutra.

En las espiras puestas en cortocircuito por las escobillas situadas cerca de la línea neutra, la componente estática da lugar a una corriente de gran intensidad y, por consiguiente, a grandes chispas.

Para evitar estas chispas, es preciso anular el flujo periódico a través de las espiras en conmutación. A este efecto se dispone sobre el circuito magnético un devanado auxiliar por el que se hace pasar una corriente de igual período que la corriente inductora, estando dispuestos los planos de las espiras de este devanado de tal manera que el flujo que producen sea perpendicular al flujo principal. Se ve fácilmente que este devanado compensador neutraliza la reacción transversal del inducido y facilita la conmutación.

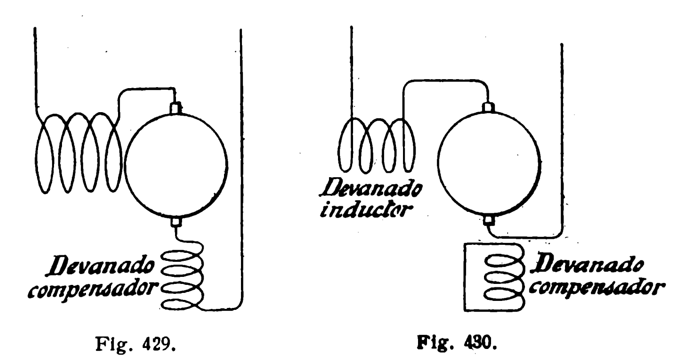


Fig. 429. Fig. 430.

El devanado compensador puede intercalarse en el circuito (fig. 429), o bien cerrarse sobre sí mismo en cortocircuito (fig. 430).

Propiedades.—Un motor compensado tiene casi las mismas propiedades características que un motor serie de corriente continua, que son: par motor potente al

arrancar, aproximadamente proporcional al cuadrado de la tensión entre sus bornes; velocidad rápidamente creciente cuando el par resistente disminuye.

La velocidad normal de funcionamiento es la que corresponde al doble de la velocidad de sincronismo; la velocidad puede variar sin inconveniente en la relación de 1 a 2,5.

Las condiciones de funcionamiento y de rendimiento son tanto mejores cuanto menor es la frecuencia de la corriente de alimentación.

En la práctica, se emplean estos motores solamente para frecuencias mayores de 25 períodos y para tensiones que pasen de 300 volts. Se utilizan casi exclusivamente en la tracción.

Regulación. — Se regula la velocidad de estos motores variando la tensión aplicada, mediante un autotransformador.

B. **Motor de repulsión.** — El motor de repulsión consta de un inductor fijo recorrido por la corriente de alimentación y de un inducido de motor de corriente continua, cuyas escobillas están unidas en cortocircuito. El circuito magnético está formado por dos anillos concéntricos de láminas, en cuyas ranuras van alojados los conductores inducidos e inductores.

Si las escobillas están sobre la línea neutra, no hay corriente en las espiras del inducido. En efecto, sea en un instante dado NS la línea de los polos y supongamos que en este instante el flujo inductor sea creciente: aplicando las reglas del sacacorchos, se ve que en las espiras situadas a ambos lados de la línea de los polos NS se producen fuerzas electromotrices de sentido contrario (fig. 431), y por consiguiente las espiras comprendidas entre las dos escobillas a y b forman, a izquierda y derecha de la línea ab, dos partes montadas

en oposición. Por consiguiente, ni en las espiras ni en los conductores que ponen en cortocircuito a las esco-

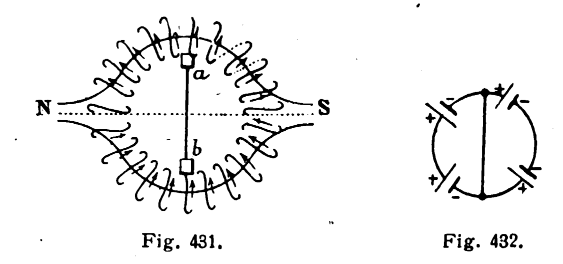


Fig. 431. Fig. 432.

billas se produce corriente, cualquiera que sea el momento considerado (fig. 432). Por lo tanto no se ejerce par alguno sobre el inducido.

Si las escobillas están sobre la línea de los polos (figura 433), las espiras están, a una y otra parte de esta línea, montadas en serie, siendo recorridas por una corriente intensa que pasa también por el conductor que pone las escobillas en cortocircuito (fig. 434). Esta corriente da lugar a un campo del mismo sentido que el flujo inductor, y en fase con este último, pues la fuerza electromotriz inducida en las espiras está defasada 90° sobre el flujo inductor, y a causa de la gran autoinducción y de la pequeña resistencia del inducido, la corriente está también defasada 90° sobre la fuerza electromotriz; luego la corriente y por lo tanto el flujo que produce están en fase con el flujo inductor.

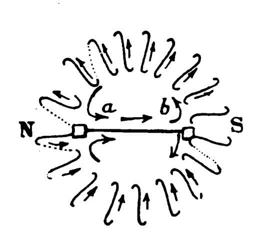


Fig. 433.

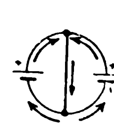


Fig. 434.

En estas condiciones, los dos campos inductor e inducido tienen la misma dirección, y no se ejerce entre ambos ningún par.

Si la línea de las escobillas está en una posición intermedia entre la línea de los polos y la línea neutra, habrá una corriente en el inducido, y el campo creado formará un cierto ángulo con el campo inductor, ejerciéndose por lo tanto un par sobre el inducido. Es evidente que por estar los dos campos en fase, el par será siempre del mismo sentido y el motor tomará un movimiento continuo de rotación.

Es fácil ver que este sentido es contrario al del ángulo de desvío de las escobillas, es decir, que las escobillas están desviadas de la línea neutra en sentido inverso del sentido de rotación. En efecto, sea $a\,b$ (figura 435) la posición de las escobillas, formando su línea con la neutra un ángulo α. Si en un momento dado el campo inductor tiene la dirección NS y es creciente, se ve que las fuerzas electromotrices inducidas en las espiras tienen el sentido de las flechas f' y, como las corrientes están defasadas 90° sobre las fuerzas electromotrices, las corrientes irán en sentido inverso f. Si, al contrario, el flujo fuera decreciente, las fuerzas electromotrices y las corrientes tendrían el mismo sentido (fig. 436). Por consiguiente, cualquiera que sea el instante considerado, los polos N', S' creados por el

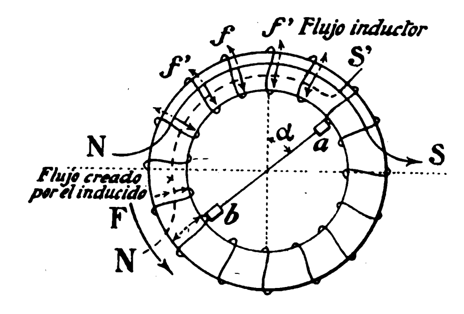


Fig. 435.

circuito inducido están frente a polos del mismo nombre inductores N, S; por lo tanto se ejerce entre unos polos y otros una cierta repulsión, resultando una rotación en el sentido F antes indicado. Es fácil ver que si se desvían las escobillas en sentido inverso respecto a la línea neutra, se invertirá el sentido de rotación del motor.

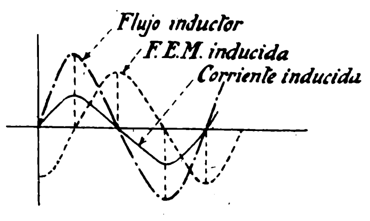


Fig. 436.

El par motor varía con el ángulo de desvío; estas variaciones están indicadas en la curva de la figura 437;

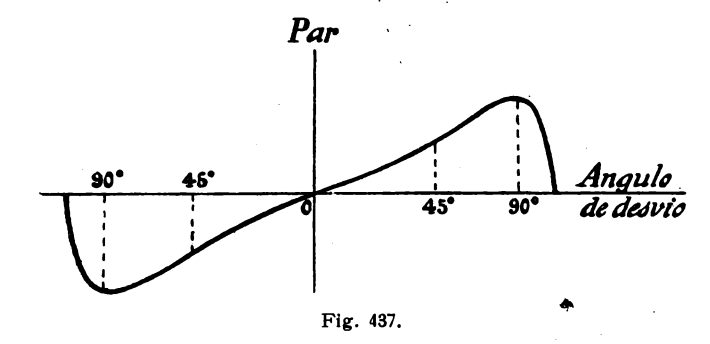


Fig. 437.

donde se ve que el par es máximo cuando este ángulo es de unos 80°.

Arranque. — No se puede arrancar bajo la tensión normal con la posición de las escobillas correspondiente al par máximo, porque se tendría una corriente de excesiva intensidad.

Por consiguiente se debe reducir la tensión al arrancar, mediante un transformador, o cerrar el interruptor cuando las escobillas están en la línea neutra e irlas desviando poco a poco hacia los polos.

El par motor va creciendo al mismo tiempo y el

motor arrancará cuando este par alcance el valor del par resistente.

Regulación. — Se regula la velocidad variando la desviación de las escobillas. La velocidad aumenta a medida que se acerca la línea de las escobillas al eje de los polos, pasa por un máximo y disminuye hasta cero cuando las escobillas están sobre la línea de los polos. Por consiguiente se podrá disminuir la velocidad acercando la línea de las escobillas, a partir de la posición de par máximo, a la línea neutra o a los polos. Se obtienen variaciones menos bruscas acercándose a los polos, y variando el ángulo de desvío (contado desde la línea neutra) desde unos 80° (velocidad máxima) a cero (velocidad nula).

Cambio del sentido de rotación. — Se cambia el sentido de rotación del motor desviando las escobillas en sentido inverso respecto a la línea neutra.

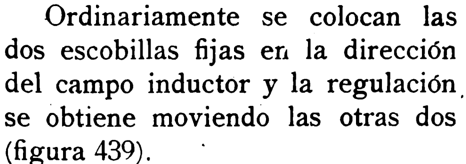
Propiedades. — Las condiciones de funcionamiento, rendimiento y conmutación, son tanto mejores cuanto más se acerca la velocidad a la del sincronismo, mientras que el motor serie debe funcionar a una gran velocidad respecto a la del sincronismo. La frecuencia de la corriente no debe ser demasiado baja, de 25 a 50 períodos, mientras que el funcionamiento del motor serie es mejor con bajas frecuencias, 15 a 20 períodos.

En el motor de repulsión, la corriente de alimentación sólo pasa por el estator; por lo tanto, se puede utilizar este motor bajo altas tensiones.

Por último, y según indica la curva de la figura 437, el par motor es muy pequeño al arrancar.

La *Compañía electromecánica* construye el motor de repulsión sistema *Déri* con dos pares de escobillas dispuestas como indica la figura 438. El arranque y la regulación de velocidad se obtienen moviendo al mismo tiempo las dos líneas de escobillas, permaneciendo fijo

el ángulo que entre sí forman dichas líneas, o bien moviendo una de ellas y manteniendo fija la otra.



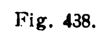


Fig. 438.

Ordinariamente se colocan las dos escobillas fijas en la dirección del campo inductor y la regulación se obtiene moviendo las otras dos (figura 439).

La «Société des Moteurs Legendre» construye, para pequeñas potencias (hasta 1 HP) un motor de repulsión cuyo inducido lleva un arrollamiento en forma de jaula; este motor arranca como un motor asincrónico, sin necesidad de ningún dispositivo mecánico.

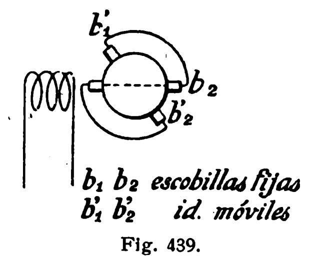


Fig. 439.

Dicha sociedad construye asimismo un motor de repulsión-inducción. Es un motor de colector en el que un dispositivo mecánico pone en cortocircuito las escobillas a una velocidad próxima a la del sincronismo. Desde 2 HP hasta 15 HP este dispositivo es reemplazado por un combinador de fuerza centrífuga que pone en cortocircuito tres puntos del inducido a 120 grados eléctricos.

Estos motores, que en el arranque tienen un par mayor que el doble del par normal, con una absorción de corriente moderada, se emplean corrientemente en los aparatos de elevación, especialmente en el mando de ascensores y montacargas.

C. **Motor de repulsión compensado.** — En serie con el devanado inductor principal, se dispone otro devanado, de manera que produzca un campo de dirección perpendicular a la del campo principal (fig. 440).

Entonces pueden colocarse las escobillas sobre la línea de los polos, lo cual origina una corriente de gran intensidad en las espiras del inducido, y el campo auxiliar producido se orienta de modo que se desarrolla el par máximo.

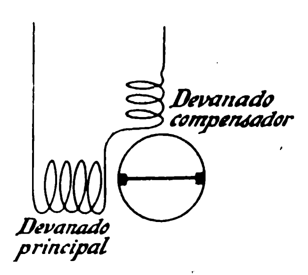


Fig. 440.

Así se obtiene un gran par de arranque y mejores condiciones de funcionamiento (rendimiento, factor de potencia, conmutación) que con el motor de repulsión.

Cambio del sentido de rotación. — Se obtiene este cambio invirtiendo el sentido de la corriente en uno de los devanados.

Regulación. — Las variaciones de velocidad se consiguen variando la tensión aplicada, ya sea poniendo resistencias en serie, o por medio de un autotransformador.

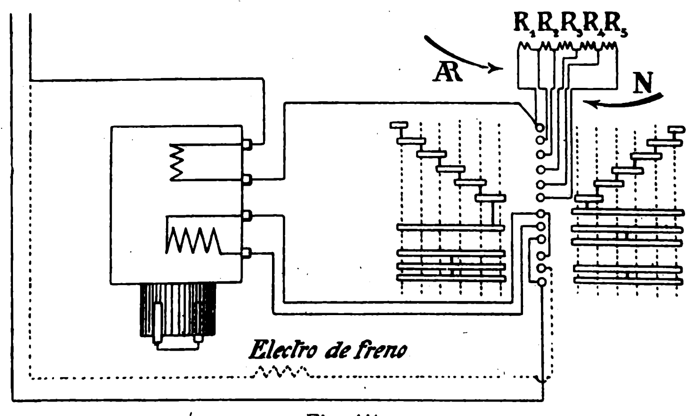


Fig. 441.

La figura 441 representa el esquema de montaje de

un motor de esta clase con cambio de sentido de rotación y variaciones de velocidad por resistencias en serie mediante un controller.

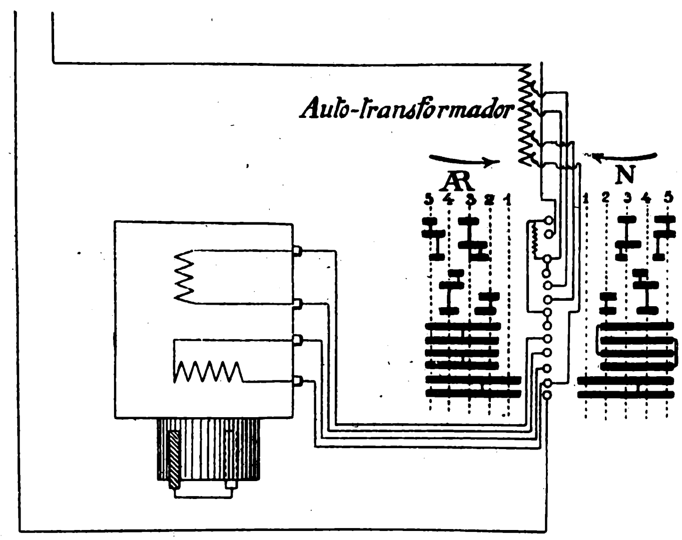


Fig. 442.

La figura 442 da el esquema de montaje de un controller que permite cambiar el sentido de rotación y regular la velocidad por medio de un autotransformador.

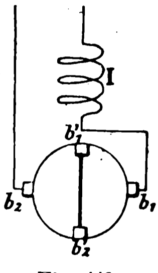


Fig. 443.

D. **Motor Latour.** — Puede ser de característica serie o shunt.

a) MOTOR DE CARACTERÍSTICA SERIE. — Este motor tiene dos líneas de escobillas perpendiculares entre sí: una dirigida según el eje del campo inductor, con sus escobillas unidas en cortocircuito, y la otra en serie con el circuito inductor (figura 443).

La corriente principal I al pasar por el inducido entre las escobillas b_1 y b_2 produce un campo en fase con el campo inductor, teniendo estos dos campos direcciones perpendiculares; por consiguiente, entre ambos campos se ejerce un par que tiende a mover el inducido. Además, el campo inductor produce en las espiras del inducido una fuerza electromotriz de inducción en cuadratura con el mismo; ahora bien, como a causa de la gran autoinducción del inducido (en comparación con su resistencia óhmica), la corriente interna que se cierra por las escobillas b'_1, b'_2, puestas en corto circuito, está en cuadratura con la fuerza electromotriz que la produce, esta misma corriente estará en fase con el flujo inductor y por consiguiente con la corriente de alimentación I. Luego las dos corrientes que circulan por el inducido, una entre las escobillas b_1 y b_2, y la otra entre las escobillas b'_1 y b'_2, engendran dos campos en fase y dirigidos perpendicularmente entre sí, resultando un par que hace mover al inducido.

Estos dos pares tienen una resultante cuyo valor es el del par que actúa sobre el inducido; por consiguiente este motor obra como un motor de repulsión.

Cerca del sincronismo tiene un buen rendimiento y un gran factor de potencia, funcionando en buenas condiciones con frecuencias elevadas, 40 a 50 períodos, y su velocidad varía rápidamente con el par. Se emplea sobre todo en la tracción; la regulación se obtiene variando la tensión aplicada mediante un autotransformador.

b) MOTOR DE CARACTERÍSTICA SHUNT. — Sobre el estator hay tres devanados, como indica la figura 444. Los dos devanados S_1 y S_2 tienen sus ejes perpendiculares y son recorridos por la corriente de alimentación como en un motor de repulsión. Sobre el colector

hay dos pares de escobillas b_1, b_2 y b'_1, b'_2 dispuestas en dos líneas perpendiculares y según los ejes de los dos campos creados por los devanados S_1 y S_2. Las escobillas b_1 y b_2 están en cortocircuito; las otras dos b'_1 y b'_2 están unidas al tercer devanado del estator S_3, que da lugar, al ser recorrido por una corriente, a un campo del mismo eje que el de S_1; el circuito se abre o se cierra mediante el interruptor I.

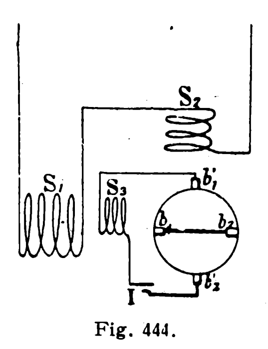


Fig. 444.

Al arrancar, el interruptor I está abierto y el motor arranca como un motor de repulsión compensado, cerrando el interruptor de la línea; así se tiene un gran par de arranque. Cuando el motor alcanza su velocidad de sincronismo, se cierra el interruptor I, y la velocidad se conserva sensiblemente constante.

Puede formarse una ligera idea del efecto del devanado S_3 del modo siguiente:

Si el par resistente aumenta, la corriente en el devanado S_2 aumenta también; el flujo producido por S_2 y, por consiguiente, la corriente inducida que se cierra en S_3 por las escobillas b'_1 y b'_2 crece, lo cual hace que aumente el par motor. Del mismo modo, si el par resistente disminuye, el par motor disminuye también y la velocidad permanece constante.

Ordinariamente el interruptor I se cierra automáticamente por un aparato de fuerza centrífuga fijo en el árbol, en cuanto el motor alcanza la velocidad del sincronismo.

Para cambiar el sentido de rotación en este motor, basta invertir la corriente en uno de los devanados S_1, S_2 y en el S_3 (fig. 445).

Esta maniobra puede hacerse mediante dos inversores C_1 y C_2 (fig. 446). Se ve que, cuando las láminas

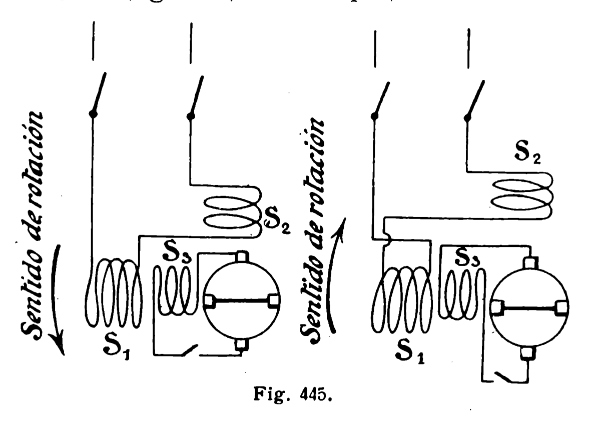


Fig. 445.

pasan de los contactos *a*, *b* y *d*, *e* a los *a'*, *b'* y *d'*, *e'*, no se altera el sentido de la corriente en S_2 y que se

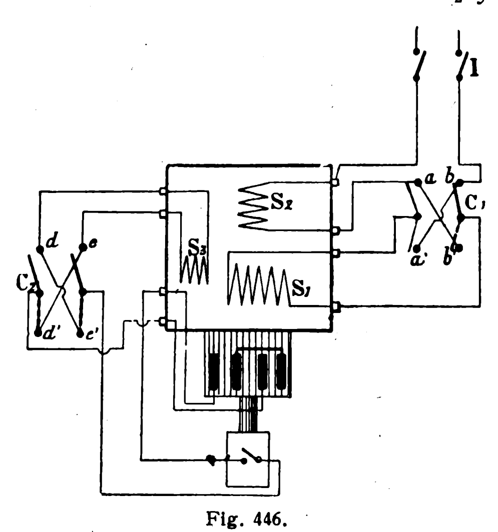


Fig. 446.

invierte en S_1 y en S_3, lo cual hace que se invierta el sentido de rotación del motor.

También puede emplearse un controller, como indica la figura 447.

El motor gira en un cierto sentido cuando los contactos C_1 están sobre los topes P, y en sentido contrario cuando los contactos C_2 están sobre dichos topes.

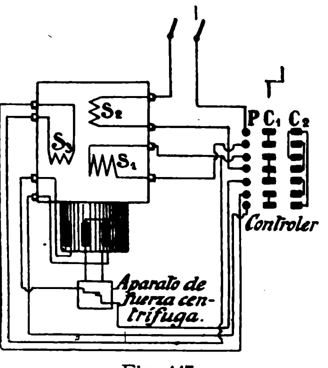


Fig. 447.

Propiedades. — Estos dos tipos de motor (figura 448) arrancan con un par cuyo valor es de dos a tres veces el par normal, pudiendo soportar una sobrecarga de 50 %, y siendo la corriente de arranque de una y media a dos veces la corriente normal.

Su factor de potencia en carga normal varía de 0,95 a 1; la corriente en vacío es $^1/_5$ de la corriente en

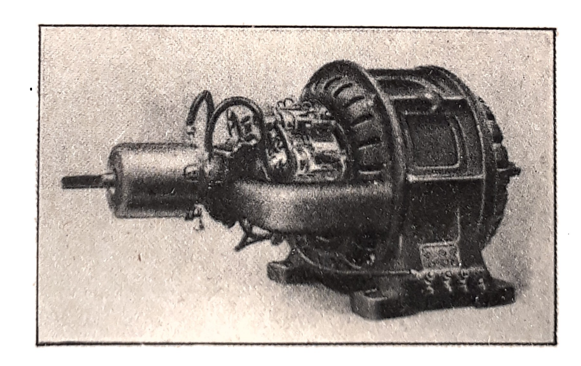


Fig. 448.

plena carga. Por último, tienen la propiedad de frenar eléctricamente por recuperación de energía, cuando

haciéndose motriz la carga tiende a mover el motor con una velocidad mayor que la del sincronismo.

Estos motores se emplean mucho en las máquinas elevadoras cuando se necesita un gran par de arranque y alcanzar en seguida una velocidad constante (ascensores, montacargas, etc.).

III. Motores sincrónicos polifásicos

Los motores sincrónicos son alternadores que funcionan como receptores. El circuito inductor está alimentado por un generador auxiliar, o máquina *excitatriz,* y los devanados inducidos por el generador principal.

La excitatriz puede ser movida por el mismo motor, ya sea mediante una correa, o montándola en el extremo del árbol del motor, pudiendo, por consiguiente, ser independiente del motor. A veces se obtiene la corriente de excitación transformando la corriente alterna del generador en corriente continua.

Estos motores no pueden arrancar por sí solos, ni en vacío; es preciso, por un procedimiento cualquiera, comunicarles una velocidad inicial conveniente (velocidad de sincronismo). Una vez en marcha, conservan estos motores una velocidad rigurosamente constante, cualquiera que sea la carga; si el par resistente pasa de un cierto valor, el motor se para y no puede adquirir de nuevo por sí mismo su velocidad, diciéndose que el motor ha caído fuera de fase *(décroché).*

Velocidad. — La velocidad invariable del motor es:

$$N = \frac{n}{p} \text{ vueltas por minuto,}$$

siendo n la frecuencia de la corriente que alimenta el motor y p el número de pares de polos inductores.

Excitación. — Cuando se alimenta un motor sincrónico a tensión constante, se puede mantener invariable la potencia desarrollada en su polea haciendo variar la corriente de excitación. La corriente tomada por el motor cambia al mismo tiempo que la excitación y al mismo también que el factor de potencia.

Para cada valor de la potencia que debe producir el motor, hay un valor de la corriente de excitación que corresponde al funcionamiento más favorable; es decir, corriente mínima y factor de potencia igual a la unidad.

Si aumenta la corriente de excitación, se defasa la corriente sobre la tensión, de modo que el motor obra, desde el punto de vista del defasaje, como un condensador.

Procedimientos para el arranque. — 1.° *Arranque como motor asincrónico.* — No se excita el motor y se envían corrientes bajo tensión reducida a los devanados del inducido, produciéndose un campo giratorio que induce en las masas polares corrientes de Foucault, y resulta de estas corrientes y del campo giratorio un par que hace que el motor arranque como motor asincrónico. Sin embargo, este par no es grande y sólo sirve para el arranque de vacío; la corriente es aproximadamente vez y media la de plena carga.

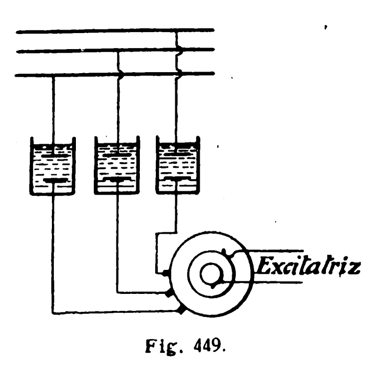


Fig. 449.

Cuando la velocidad alcanza un valor próximo al sincronismo, se excita el motor, que está entonces en fase *(accroché),* y se alimenta el inducido bajo la tensión normal.

Para obtener la tensión reducida, indispensable para que la corriente de arranque no tome un valor excesivo, se introducen en las líneas reostatos que se ponen en cortocircuito cuando el motor arranca (fig. 449), o bien se emplean autotransformadores (fig. 450).

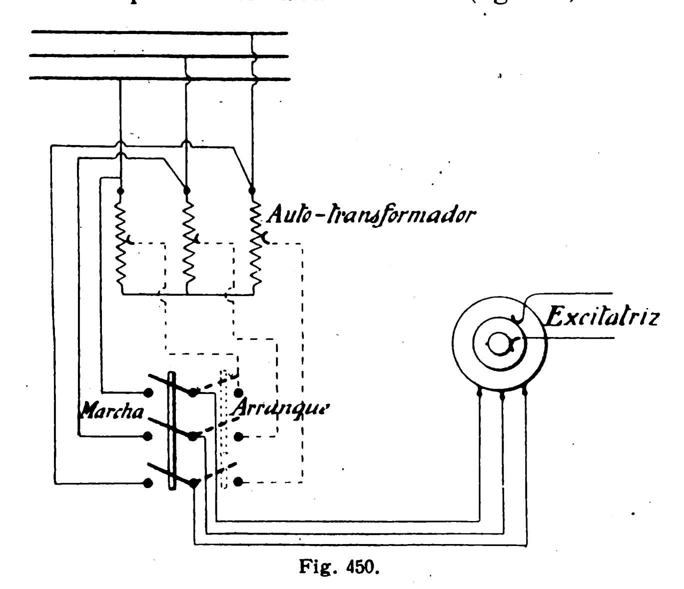


Fig. 450.

Se sabe que la velocidad está próxima al sincronismo por el amperímetro, que empieza a marcar una corriente constante. Si después de poner el motor bajo tensión normal, se eleva la intensidad considerablemente, es preciso cerrar el interruptor y empezar otra vez la operación: el motor no se ha puesto en fase.

El campo giratorio produce en el circuito inductor una tensión inducida elevada que puede alcanzar un

valor peligroso para el aislamiento de este devanado; para evitar el deterioro del aislador, es prudente cerrar el circuito inductor sobre sí mismo, ya sea en corto-circuito o a través de una resistencia.

2.° *Arranque mediante un motor auxiliar.* — Se pone en marcha el motor auxiliar de manera que

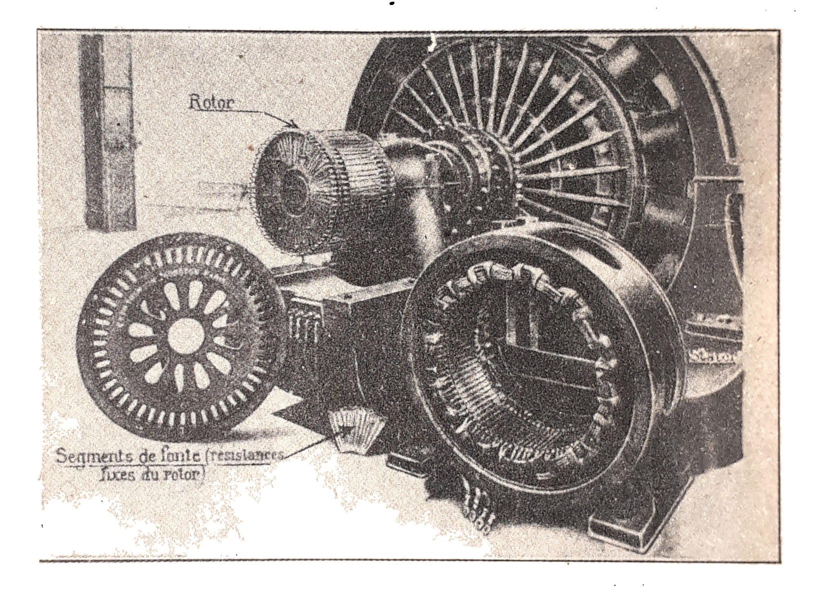


Fig. 451.
Motor sincrónico movido al arrancar por un motor asincrónico bifásico de jaula de ardilla.

alcance la velocidad de sincronismo; se regula la excitación de modo que se llegue a una tensión igual a la que hay entre las líneas de alimentación, y se une el motor a las líneas, cerrando el interruptor en el momento en que estas dos tensiones están en oposición.

El motor auxiliar puede ser una dinamo de corriente continua, ya sea la excitatriz o una máquina accionada

por el motor sincrónico; se alimenta el motor auxiliar con un generador de corriente continua, una batería de acumuladores, por ejemplo.

Si no se dispone de corriente continua, el motor auxiliar es un motor asincrónico de poca potencia (10 a 15 $^{o}/_{0}$ de la del motor sincrónico). Este motor auxiliar, alimentado por el generador, está ordinariamente montado en el extremo del árbol y debe tener un número de polos inferior al del motor sincrónico (figura 451).

Lámparas de fase. — Antes de dar corriente al motor, es preciso asegurarse de que ha alcanzado la velocidad de sincronismo y aprovechar el momento en que la tensión que desarrolla está en oposición con las de las líneas.

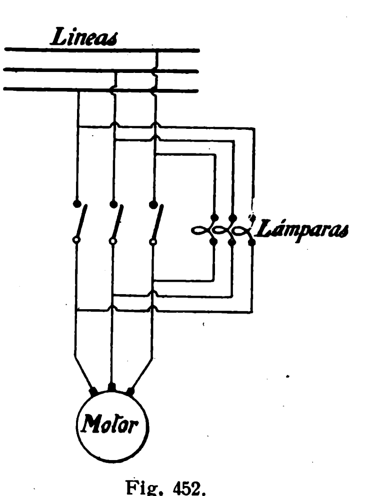


Fig. 452.

Para ello se unen los bornes o las escobillas del motor a las líneas por medio de lámparas de incandescencia (fig. 452). Estando abierto el interruptor, se excita el motor y se pone en marcha; entonces las lámparas están sometidas a una tensión resultante producida por el voltaje desarrollado por el motor y el voltaje entre las líneas. La frecuencia de la tensión desarrollada por la máquina es diferente de la del generador, de modo que las dos tensiones están tan pronto en fase como en oposición, lo cual se traduce por *pulsaciones* en las lámparas, es decir, por cambios en la inten-

sidad de la luz que dan éstas. Las conexiones entre las líneas y los bornes del motor deben hacerse de tal modo que las lámparas se enciendan y se apaguen al mismo tiempo. Si se establecen dichas conexiones de manera diferente, se ve que las lámparas se encienden y se apagan sucesivamente, dando la impresión de una luz que gira en un sentido o en el contrario, según que la velocidad del motor sea menor o mayor que la

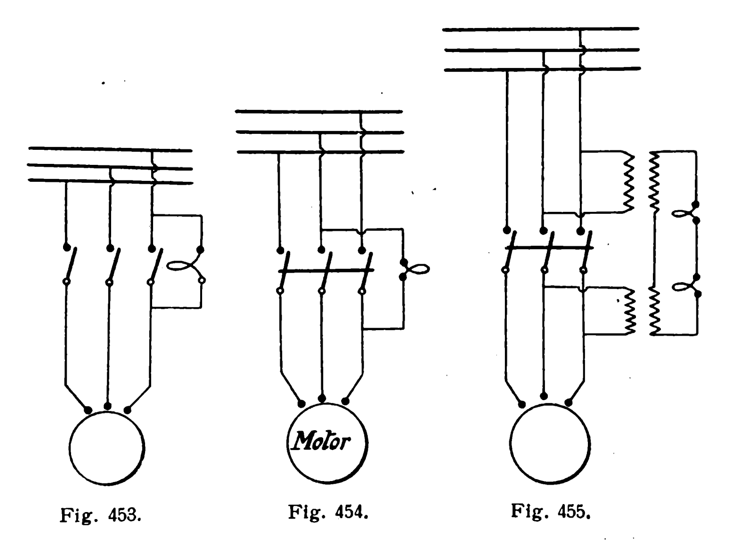


Fig. 453. Fig. 454. Fig. 455.

de sincronismo. En este caso, se cambian las conexiones entre dos líneas y dos bornes.

A medida que la velocidad del motor se acerca a la de sincronismo, las *pulsaciones* se hacen más lentas; cuando el tiempo que permanecen apagadas las lámparas es de dos segundos, aproximadamente, para los motores de poca potencia, y de cuatro a cinco para los de gran potencia, se cierra el interruptor en el momento de apagarse, estando entonces las tensiones en oposición.

Observación I. – Una vez establecidas las conexiones entre el interruptor y las líneas, no es necesario poner varias lámparas de fase, bastando con una sola (fig. 453).

Observación II. — Se puede sustituir la lámpara por un voltímetro que señala cero cuando las tensiones están en oposición.

Observación III. – Si se cruzan las conexiones de la lámpara (fig. 454), debe hacerse el acoplamiento en el instante en que alcanza su iluminación máxima.

Observación IV. — Cuando el motor está alimentado bajo tensiones elevadas, se utilizan dos transformadores cuyos primarios están montados sobre dos fases homólogas y cuyos secundarios (baja tensión) están montados en serie con las lámparas de fase (figura 455).

Indicador de sincronismo. — El indicador de sincronismo es un aparato que indica: 1.°, si el motor tiene una velocidad mayor o menor que la de sincronismo; 2.°, el valor de la diferencia entre la frecuencia de las dos tensiones, la que desarrolla el motor y la de la red; 3.°, el momento preciso en que se alcanza el sincronismo. El aparato consiste en un pequeño motor asincrónico en que el inductor es un electroimán cuyos carretes B, B están unidos entre dos líneas de alimentación, ya sea directamente o por medio de un transformador de potencia (figs. 456 y 457). El inducido tiene dos devanados E_1, E_2 que tienen un punto común O y están orientados de tal modo que cuando son recorridos por corrientes, los campos producidos son perpendiculares entre sí. Los dos devanados están unidos entre los bornes del motor que corresponden a los dos hilos de línea entre los cuales está derivado el circuito inductor.

En serie con uno de estos devanados hay un carrete de autoinducción *S* y en serie con el otro hay una resistencia sin autoinducción.

Los extremos de los devanados móviles del inducido están unidos, respectivamente, a un hilo de línea,

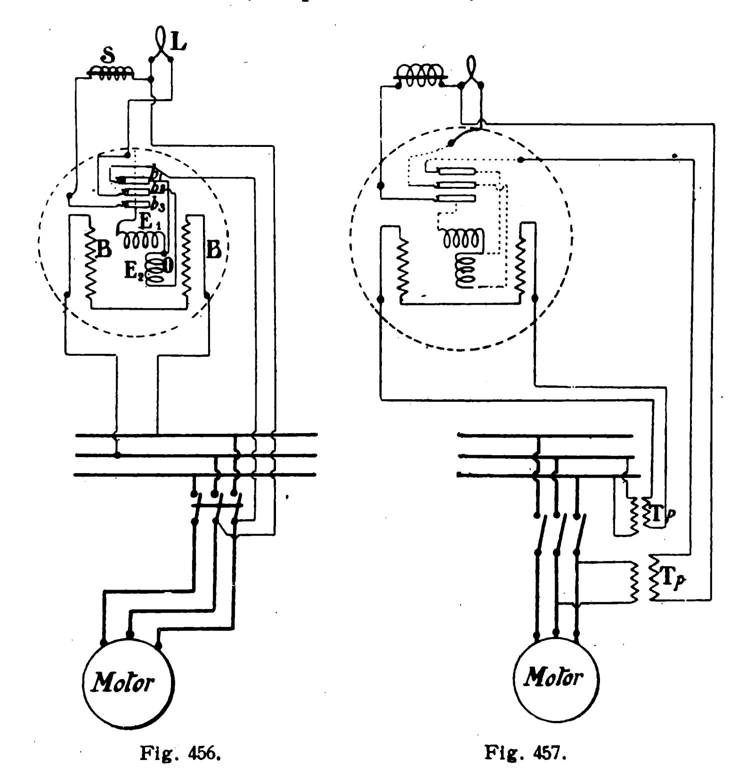


Fig. 456. Fig. 457.

al carrete de autoinducción y a la lámpara, por anillos b_1, b_2, b_3, sobre los cuales se apoyan las escobillas.

Se sabe que los devanados del inducido recorridos por dos corrientes en cuadratura dan lugar a un campo giratorio cuya velocidad angular es igual a la pulsación de la tensión producida por la rotación del motor, dando

un número de vueltas por segundo igual a la frecuencia de esta tensión.

El circuito inductor produce un campo alterno de la misma frecuencia que la tensión entre las líneas.

Recordando el principio de los motores asincrónicos, es fácil ver que si dos frecuencias difieren en una pequeña cantidad, el inducido gira en un sentido o en otro, según que la frecuencia de la tensión desarrollada por el motor sea mayor o menor que la de la tensión que hay entre las líneas. El número de vueltas por segundo es igual a la diferencia entre estas dos frecuencias. Si las dos frecuencias son iguales, el motor permanece en equilibrio.

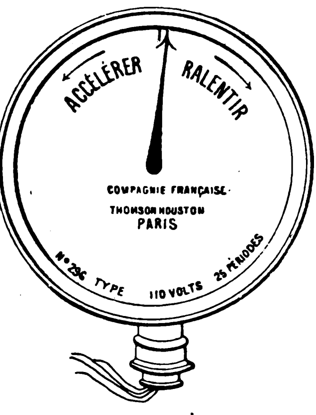


Fig. 458.

Sobre el eje del inducido hay fijada una aguja que se mueve delante de un cuadrante, sobre el que hay marcadas dos flechas y debajo de una la palabra *Acelerar,* y de la otra *Retardar*. Según que la aguja se mueva hacia una o hacia otra de estas dos flechas, es preciso acelerar o retardar el motor (figura 458).

Todo está regulado de modo que cuando la aguja está en equilibrio, en la posición vertical, las dos tensiones están en oposición de fase. Por consiguiente, se cierra el interruptor, cuando la aguja gire lentamente, en el momento de pasar por la posición vertical.

Cuando el motor está alimentado bajo una tensión muy alta, los circuitos inductor e inducido del aparato

están derivados sobre los secundarios de transformadores, como indica la figura 457.

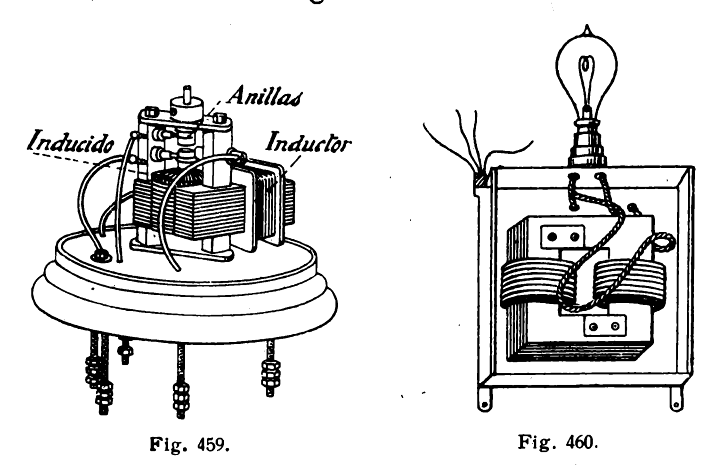


Fig. 459. Fig. 460.

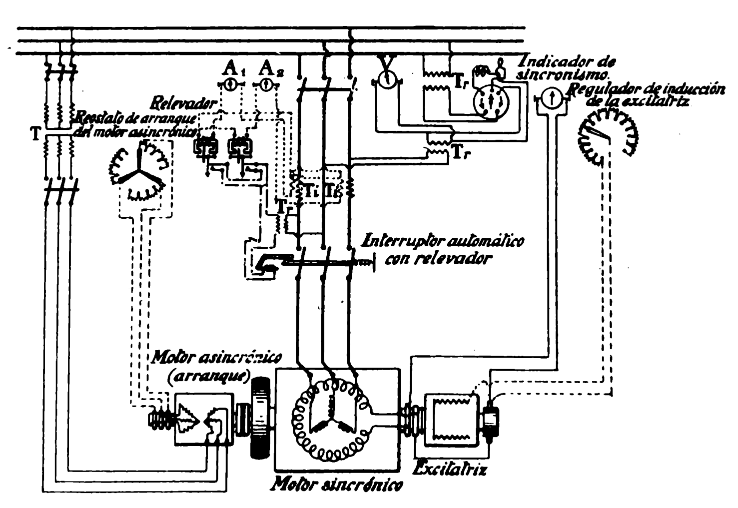


Fig. 461.

Las figuras 459 y 460 representan el sincronizador construído por la Sociedad Thomson-Houston, y el

carrete de autoinducción con la resistencia, que es una lámpara de incandescencia.

El esquema de la figura 461 representa el montaje de un motor sincrónico que arranca mediante un motor asincrónico alimentado bajo una tensión reducida por medio del transformador *T*. El indicador de sincronismo y el voltímetro funcionan bajo la tensión reducida de los transformadores de potencial T_p.

Un interruptor automático, que corta el circuito cuando la corriente pasa de un cierto valor, es accionado por un relevador cuyo funcionamiento explicaremos en el capítulo siguiente.

Los electroimanes de este relevador están alimentados por los secundarios de los transformadores de intensidad T_i, y en sus circuitos están los amperímetros A_1 y A_2.

IV. Motores sincrónicos monofásicos

Los motores sincrónicos monofásicos están construídos como los alternadores monofásicos; tienen las mismas propiedades y funcionan del mismo modo que los motores sincrónicos polifásicos.

Arranque. — 1.° *Arranque como asincrónico bifásico.* — Cuando se quiere poner en marcha un motor sincrónico monofásico sin ayuda de un motor auxiliar, se añade al inducido un devanado auxiliar independiente del devanado principal. Estos dos devanados al ser recorridos por corrientes producen campos dirigidos perpendicularmente entre sí. Se unen ambos al generador, uno por medio de una resistencia óhmica sin autoinducción, el otro por una bobina de autoinducción, obteniéndose así un campo giratorio que

engendra corrientes inducidas en las masas polares; el motor arranca como hemos visto para los motores polifásicos.

Cuando el motor está cebado, se corta el circuito auxiliar y se pone en cortocircuito la resistencia o la

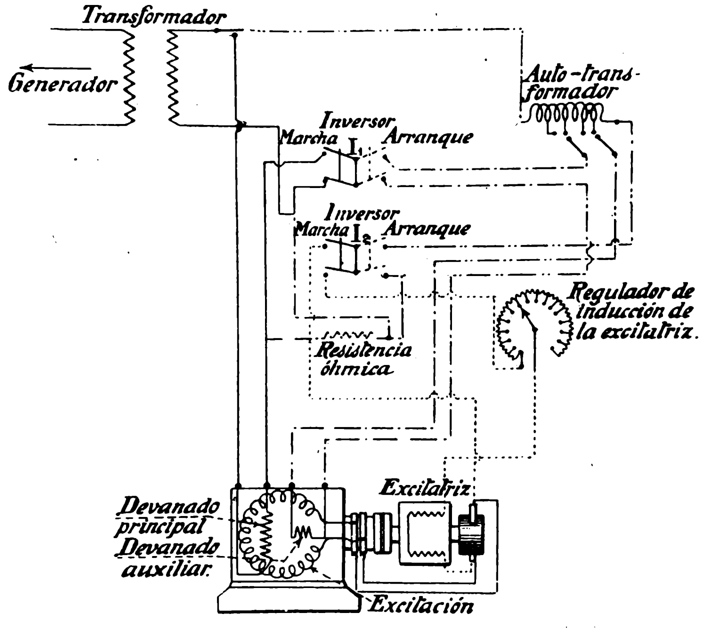


Fig. 462.

autoinducción que se había introducido en el devanado principal. Se puede sustituir la autoinducción por un autotransformador.

En el esquema de la figura 462 se ve que cuando los inversores I_1 y I_2 están en la posición de arranque:

a) El autotransformador está intercalado en la línea o en el secundario del transformador por el inversor I_2;

b) La tensión reducida del autotransformador se aplica al devanado auxiliar mediante el inversor I_1;

c) El devanado principal está unido a la línea por medio de una resistencia óhmica;

d) El motor no se excita.

Por consiguiente, el motor arranca como un asincrónico.

Se ponen los inversores en la posición de marcha y entonces:

e) La corriente queda cortada en el autotransformador y por consiguiente en el circuito auxiliar;

f) La resistencia óhmica está en cortocircuito por el inversor I_1;

g) El motor es excitado por medio del inversor I_2.

2.° ***Arranque mediante un motor auxiliar.*** — Se efectúa exactamente igual que para un motor polifásico.

CAPÍTULO IX

Instalación de motores

Los motores están generalmente fijos sobre zócalos o pilares, contra las paredes, en el suelo, o sobre las mismas máquinas que hacen funcionar.

Fijación sobre zócalos (figs. 463 a 465).—Se practica una canal a la derecha de los agujeros para los pernos de anclaje, para echar el cemento, y fijar así estos pernos cuando se hayan colocado en la posición conveniente. El motor montado en su chasis, por cuyos agujeros se han pasado los pernos de anclaje, se coloca sobre el zócalo. Se regula su posición mediante cuñas de hierro de manera que el eje de su árbol sea paralelo al de la transmisión sobre que ha de actuar, y que las dos poleas estén exactamente enfrente una de otra. Cuando se tienen cumplidas estas dos condiciones, se echa cemento en

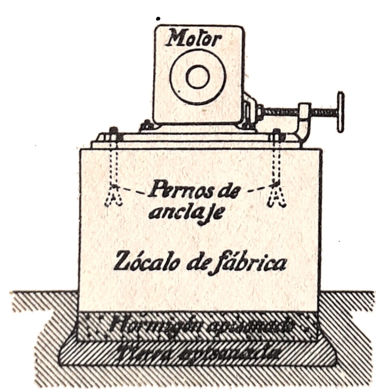


Fig. 463.

las canales; cuando ya está duro el cemento, se echa

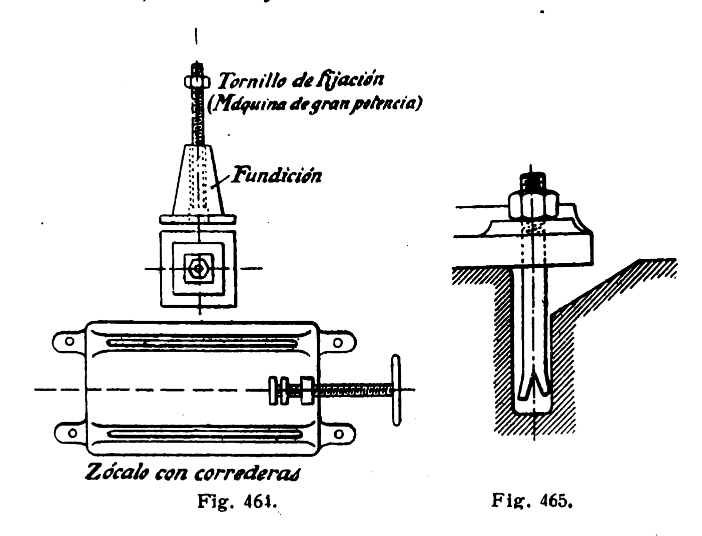


Fig. 464. Fig. 465.

cemento muy fluído entre el chasis o las correderas y el zócalo y en los huecos correspondientes a las cuñas que se hayan quitado.

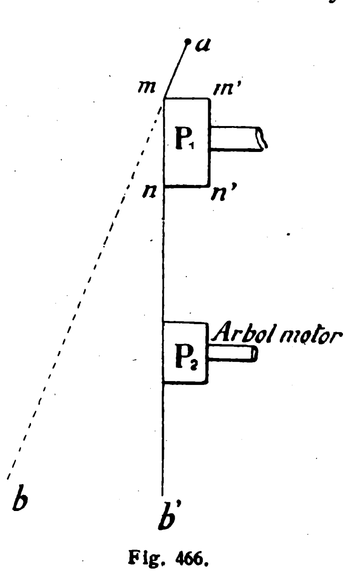


Fig. 466.

Para obtener el paralelismo entre los dos árboles se puede operar del modo siguiente.

Sea P_1 la polea que debe ser movida por el motor y P_2 la polea de este motor colocado en su zócalo, y que hay que regular (fig. 466). Dos operadores 1 y 2 colocados respectivamente el uno un poco por detrás de P_1 y el otro detrás de P_2, tienden

entre sí un hilo orientado al principio en una posición cualquiera *ab*, de modo que se apoye sobre el borde *m* de una de las dos poleas, P_1 por ejemplo. El operador 1 indica con señales al 2, en qué sentido debe mover el extremo *b* del hilo para que éste toque al borde *n* opuesto al *m* de P_1. Cuando se cumple esta condición (posición *ab'* del hilo), el operador 2 mueve el mo-

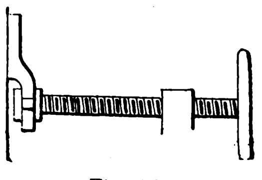


Fig. 467

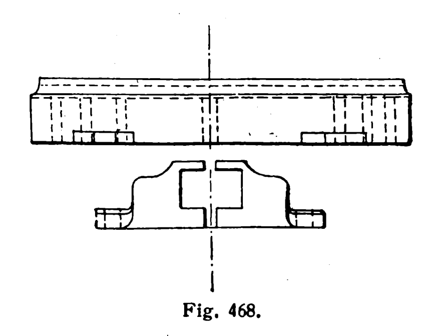


Fig. 468.

tor *M* de modo que su polea quede paralela a *mb'*. Del mismo modo se procede para el otro lado *m'n'* de la polea P_1 y se mueve el motor en la dirección de su árbol de modo que la correa quede en medio de las dos poleas.

Se comprueba el resultado, repitiendo esta operación, pero empezando por la polea P_2.

Fig. 469.

Cuando se cumplen estas condiciones, el motor se mantiene fijo en esta posición mediante cuñas de hierro y los pernos de anclaje.

Los chasis o las correderas van provistos de tenso-

res para correas. Las figuras 467 a 469 representan diferentes dispositivos. Los chasis pueden fijarse sobre la pared o sobre el techo, como indica la figura 470.

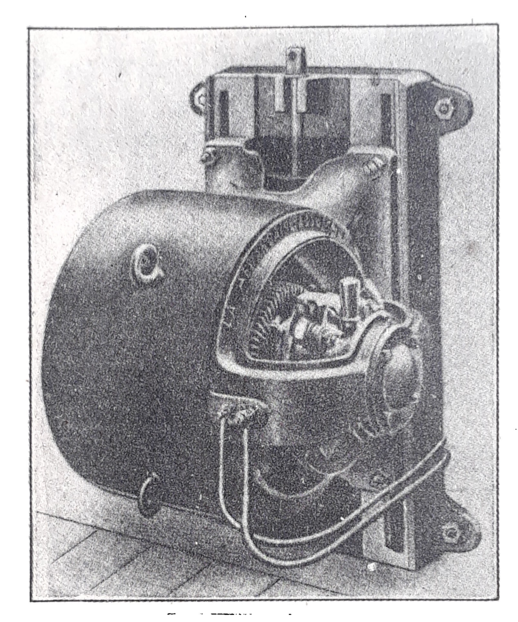


Fig. 470.

Es conveniente unir la masa del motor a tierra por medio de un hilo fijado a las correderas.

Transmisión

Transmisión por correas

Las correas se hacen generalmente de cuero, algodón, balata o piel de camello.

Las correas de cuero se emplean en la mayoría de los casos.

Las correas de balata se emplean particularmente

en locales húmedos; están formadas de una tela especial recubierta de balata (especie de gutapercha), y cilindradas a gran presión; son muy convenientes para grandes velocidades, a causa de su flexibilidad.

Las correas de piel de camello son muy buenas para locales en que se produzcan vapores calientes o alcalinos (tintes, aprestos, etc.).

El algodón es muy usado para las grandes potencias y grandes velocidades.

Empalmes. — El empalme de los dos extremos de una correa se hace de distintas maneras:

1.° *Por costura,* mediante una tira de cuero graso;

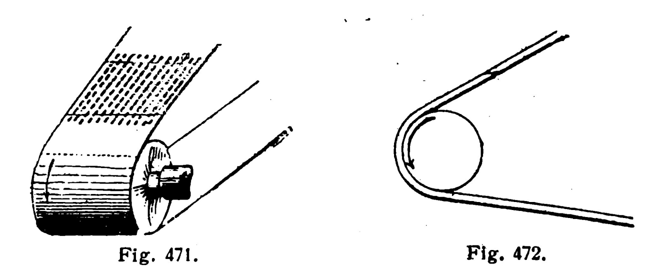


Fig. 471. Fig. 472.

los extremos se cortan en bisel en una longitud de unos 20 centímetros y los puntos de costura están espaciados

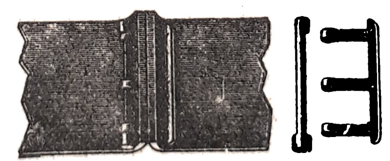
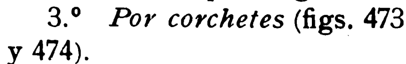


Fig. 473.

unos 5 centímetros y distantes 2 centímetros de los bordes (fig. 471).

2.° *Por encoladura.* — Los dos extremos cortados en bisel se empapan en cola fuerte y se prensan. A veces se encolan los empalmes después de cosidos. Las correas deben girar en las poleas en el sentido indicado por la figura 472.

3.° *Por corchetes* (figs. 473 y 474).



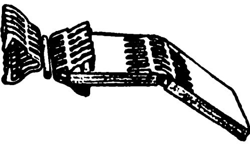


Fig. 474.

Dimensiones de las correas y poleas.—Estas dimensiones están determinadas por las fórmulas siguientes, cuya deducción y discusión corresponde a los tratados de Mecánica.

a) Sean n vueltas por segundo la velocidad de la polea y v metros por segundo la velocidad tangencial admitida; el diámetro de la polea es:

$$d = \frac{v}{\pi n}.$$

El valor más favorable de v es de 20 a 25.

b) Siendo la velocidad de la polea del motor n vueltas por segundo y su diámetro d, ¿qué diámetro D debe tener la polea accionada para que su velocidad sea de N vueltas por segundo?

Los diámetros están en relación inversa del número de vueltas:

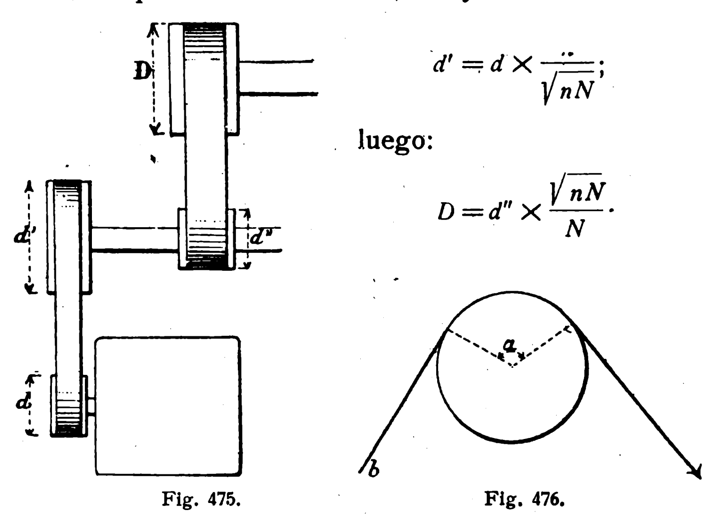
$$\frac{D}{d} = \frac{n}{N}, \qquad D = d \times \frac{n}{N}$$

Pero hay que tener en cuenta un cierto resbalamiento de la correa, que se puede evaluar en un 2 %, de manera que se tiene:

$$D = d \frac{1{,}02\, n}{N}$$

c) Transmisión intermedia (fig. 475). — Se quiere accionar una polea a N vueltas por segundo, por un motor que da n vueltas, mediante un árbol intermedio.

Se determina el diámetro d' de la polea intermedia de modo que su velocidad sea $\sqrt{nN}$ y se tiene:



$$d' = d \times \frac{n}{\sqrt{nN}};$$

luego:

$$D = d'' \times \frac{\sqrt{nN}}{N}.$$

Fig. 475. Fig. 476.

d) Fuerza tangencial. — El esfuerzo tangencial $(T - t)$ (fig. 476) tiene por valor:

$$R = T - t = \frac{P}{rn} \times \frac{75 \times 100}{2\pi} = 1194 \frac{P}{rn};$$

siendo P la potencia transmitida, expresada en caballos; r el radio de la polea, en centímetros, y n la velocidad, en vueltas por segundo.

e) Tensión sobre la correa:

$$T = R \frac{e^{f\alpha}}{e^{f\alpha} - 1} = 1194 \frac{P}{rn} \frac{e^{f\alpha}}{e^{f\alpha} - 1} \text{ kilogramos;}$$

$$t = \frac{R}{e^{f\alpha} - 1} = 1194 \frac{P}{rn} \frac{1}{e^{f\alpha} - 1} \text{ kilogramos.}$$

El número e, base de los logaritmos neperianos, vale 2,718;

f es el coeficiente de rozamiento de la correa sobre la polea;

α es el arco abrazado por la correa.

Ordinariamente se toman para f los siguientes valores:

Correas nuevas ordinarias sobre poleas de fundición	0,155
Correas viejas de cuero	0,20

Este coeficiente alcanza a veces el valor 0,6 y aun el 0,8; se ha comprobado que aumenta con la velocidad

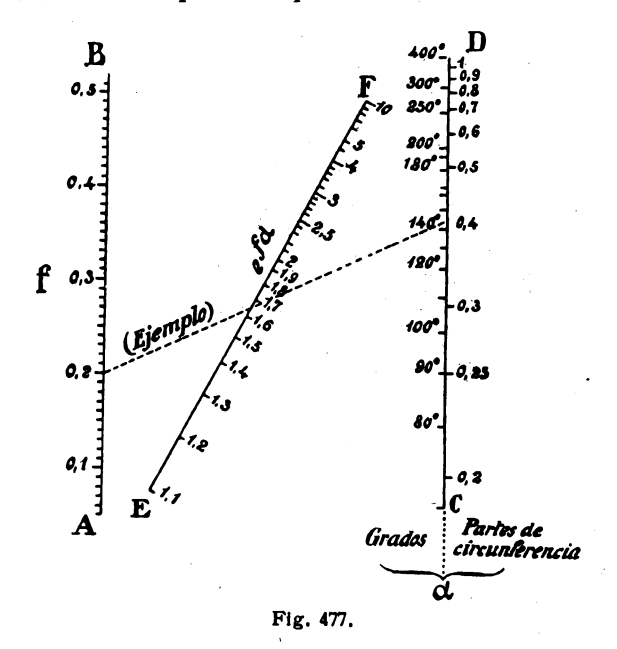


Fig. 477.

y que se pueden transmitir con correas esfuerzos tanto más grandes cuanto mayor es la velocidad.

Para las correas nuevas y muy secas, f puede bajar hasta 0,09; pero basta mojar su cara interna con un poco de aceite y de colofonia, y estirarla fuertemente, para llevar este coeficiente a su valor normal 0,2.

Los valores de $e^{f\alpha}$ se obtienen fácilmente por medio del ábaco de Soreau (fig. 477).

Se toma sobre AB el valor de f; sobre CD el de α expresado en grados o en partes de circunferencia; se unen los dos puntos resultantes por una recta que corta a EF en un punto, frente al cual se lee el valor de $e^{f\alpha}$.

Si se conocen los diámetros D, d de las dos poleas y la distancia a de sus ejes, el ángulo α queda determinado, por depender de la expresión $\frac{D-d}{a}$. El cuadro siguiente da para diferentes valores de esta expresión los valores correspondientes de α.

$\frac{D-d}{a}$	0	0,088	0,174	0 262	0,348	0,432	0,518
α	180°	175°	170°	165°	160°	155°	150°

f) Anchura de la polea. — Sea p kilogramos la tensión máxima admitida por centímetro cuadrado de sección, y a el espesor de la correa en centímetros; la anchura b está dada por la relación:

$$b = \frac{1,15}{p \times a} \cdot 1\,194 \times \frac{P}{rn} \cdot \frac{e^{f\alpha}}{e^{f\alpha} - 1}.$$

Generalmente se toma:

$p = 40$ Kg. para las correas de cuero y de piel de camello.
$p = 30$ » » » » » algodón.

EJEMPLO. — Se quiere transmitir una potencia de 10 caballos con una polea de fundición de 20 centímetros de diámetro, que gira con una velocidad de

600 vueltas por minuto, sobre la cual va una correa de cuero de 6 milímetros de espesor, siendo el arco que abraza igual a $^4/_{10}$ de la circunferencia.

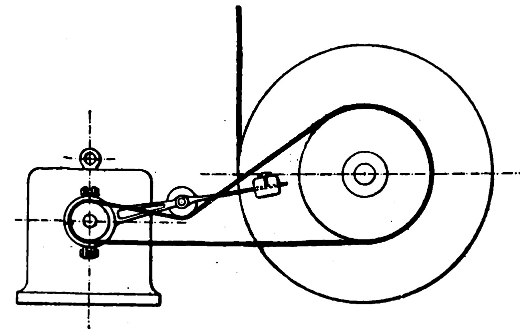


Fig. 478.

Valor de $e^{f\alpha}$. — El ábaco de Soreau da para $f = 0{,}2$ y $\alpha = 0{,}4$; $e^{f\alpha} = 1{,}65$.

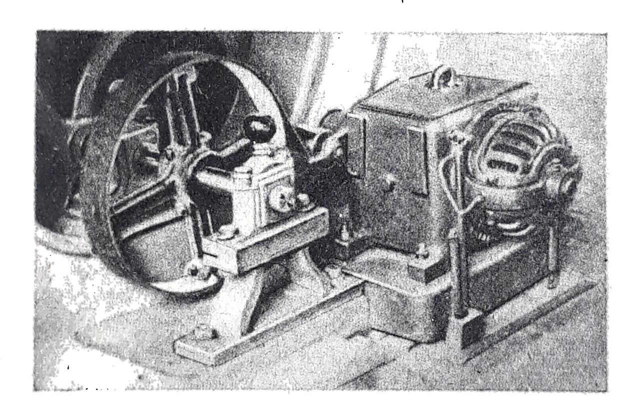


Fig. 479.

Por consiguiente, sustituyendo valores:

$$\frac{e^{f\alpha}}{e^{f\alpha}-1} = \frac{1{,}65}{0{,}65}, \quad \text{o sea} \quad \frac{e^{f\alpha}}{e^{f\alpha}-1} = 2{,}54.$$

Luego tomando $p = 40$, la anchura de la correa debe ser:

$$b = \frac{1,15}{40 \times 0,6} \times 1194 \times \frac{10}{10 \times \frac{600}{60}} \times 2,54 \text{ centímetros,}$$

o sea:

$$b = 145 \text{ milímetros.}$$

Cuando las poleas tienen que acercarse bastante y sus diámetros son muy diferentes, el arco abrazado por la menor es a veces demasiado pequeño; en este caso se aumenta este arco por medio de un rodillo sistema Leneveu (figs. 478 y 479); el rodillo se monta cerca de la polea menor sobre una palanca que puede oscilar alrededor del eje de la misma polea, de tal manera que se apoye sobre el ramal conducido.

Acoplamiento por manguitos

Los manguitos de acoplamiento se emplean cuando la máquina movida por el motor debe tener la misma velocidad que éste.

En general, el acoplamiento es elástico y la elasti-

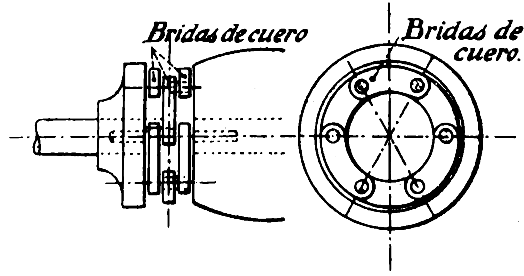


Fig. 480.

cidad se obtiene frecuentemente por medio de bridas de cuero y de anillos de caucho que aprietan entre

sí dos rodillos montados sobre gorrones, fijo uno de

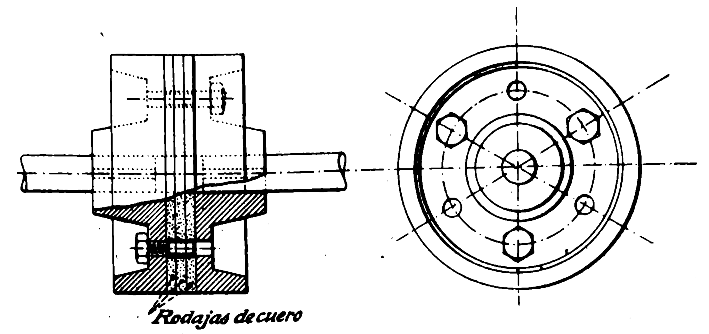


Fig. 481.

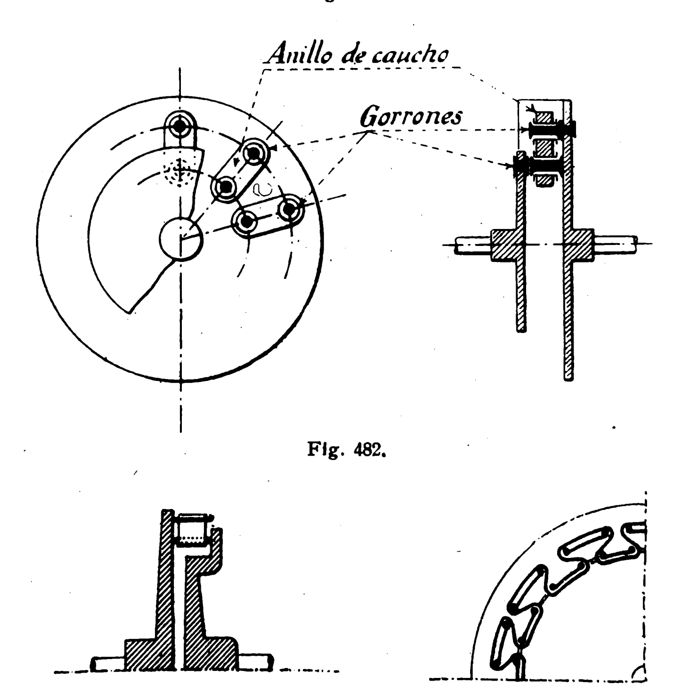


Fig. 482.

Fig. 483.

ellos en uno de los platos y el otro sobre el otro plato

(empalme Raffard), o por discos de cuero (figs. 480 a 482), o por una correa de cuero formando recodos (figura 483).

A veces el acoplamiento es rígido y los dos platos se unen por medio de pernos y tuercas.

Caso de máquinas montadas en un mismo zócalo

Si los cojinetes del árbol del motor forman parte de la armazón del mismo, que es el caso de las máquinas pequeñas, no hay más que poner el motor en el zócalo bien allanado de antemano, igualar las alturas del eje mediante láminas y cuñas, y colocar los dos ejes (el del motor y el de la máquina accionada) en prolongación uno de otro. Para ello se acercan las dos bases de los manguitos, colocadas perpendicularmente al eje, hasta tocar con una tabla o disco de madera, de 6 a 12 milímetros de espesor. Para que los manguitos sean paralelos, se apoya una regla sobre la superficie lateral

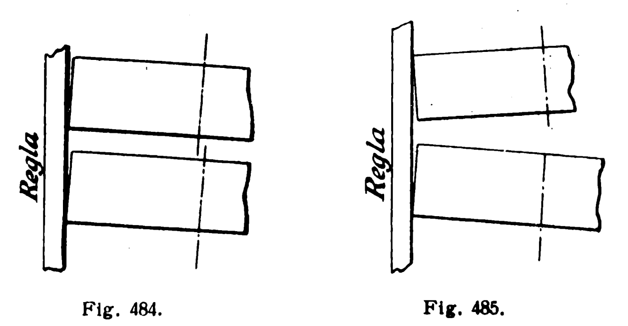


Fig. 484. Fig. 485.

de ambos, y se regula la posición de las máquinas, de manera que la regla quede perfectamente adaptada a dichas superficies. Hecho esto, se fijan las máquinas y

se unen los manguitos mediante tornillos (figs. 484 a 486).

Si los cojinetes están separados del armazón, se ajusta la altura y la dirección del eje del rotor por medio de los cojinetes; una vez bien colocados éstos, se ajusta la culata de modo que el eje (visto de perfil) de las piezas polares o del paquete de láminas se confunda con el eje del hierro del rotor. Después se iguala el entrehierro alrededor de este eje y se fija con clavijas.

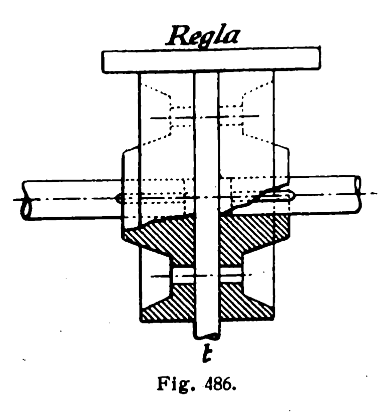
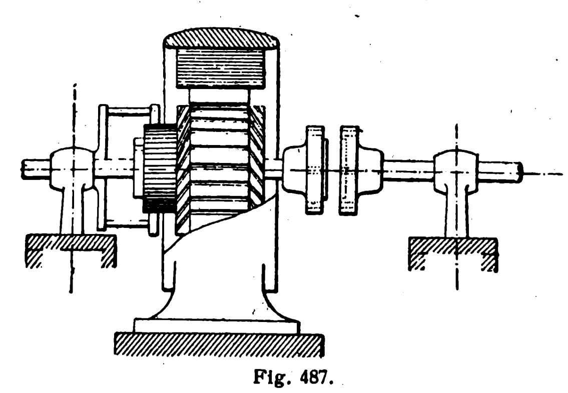


Fig. 486.

Máquina de árbol cortado

En este caso, los acoplamientos son muy rígidos; se emplean en los convertidores o grupos electrógenos


Fig. 487.

para economizar un cojinete. El árbol tiene en este

caso un gorrón en un extremo y en el otro un manguito de platos (fig. 487). Se coloca el árbol de la dinamo en prolongación del árbol a que se acopla, poniendo a tope los dos platos del manguito y sosteniendo el árbol con palancas o tacos; se apoya el extremo libre del árbol sobre su soporte de manera que quede bien sostenido por el cojinete (siempre deben emplearse tacos metálicos, que no se hienden). Se fija después el cojinete mediante pernos y pasadores, o con cemento.

Estando colocado el inducido se regula la armazón según el inducido (entrehierro y eje).

Fijación del inducido en un árbol de otra máquina

Este caso se presenta cuando la máquina, motriz o conducida, es demasiado pesada para viajar en un solo bloque, o cuando es de procedencia extraña.

Si el rotor es de dos piezas, se coloca la primera mitad en el hueco de la máquina, después se coloca el árbol en sus cojinetes, y finalmente la segunda mitad.

Si el inducido es de una sola pieza (condición necesaria cuando hay colector), hay que asegurarse previamente del exacto calibrado del árbol y del agujero en que ha de penetrar. Después se desliza el árbol en el agujero, tomando las debidas precauciones para evitar un atascamiento que una vez producido es difícil de deshacer. Para ello se presenta el árbol engrasado con una mezcla de sebo y aceite o con grafito, dejando suspendido el extremo del árbol para variar ligeramente la presentación en caso necesario. Se ejerce una fuerte presión en el extremo del árbol por medio de tuercas, y finalmente se coloca todo sobre los cojinetes. Si el árbol resultase demasiado ajustado, se podría calentar un poco la parte central del inducido.

Observaciones generales sobre el montaje

En todos los casos de instalación en edificios, es conveniente inspeccionar minuciosamente antes de verificarla, todos los zócalos de fábrica.

Para las maniobras, se utilizan palancas, crics y rodillos; a veces se recurre al plano inclinado, pero hay que tener la precaución de amarrar las piezas para evitar una caída brusca. Las piezas deben amarrarse con cuerdas probadas de antemano y no con cadenas o cables de acero que pueden romperse bruscamente.

Para las máquinas de gran velocidad, la cuestión mecánica es de la mayor importancia para el montador; las nivelaciones deben hacerse cuidadosamente. Los cojinetes han de ser de engrase a presión o de anillas con gran gasto de aceite. El equilibrado hay que hacerlo de antemano sobre aristas vivas, y después de hecho el montaje, en marcha.

Para retener el aceite, se ponen ordinariamente anillas ajustadas a frotamiento suave sobre el árbol y alojadas en ranuras idénticas hechas en el cojinete. El juego lateral es grande en general para los motores; así se evita que el extremo del árbol se agarre en el cojinete, ya que el inducido toma por sí mismo su posición, gracias a la acción magnética.

La disposición misma de las anillas en los cojinetes hace que éstos resulten estancos al aceite a presión, pues no teniendo más que un canal, el aceite no puede salir como no sea por los lados de los cojinetes. Sin embargo se tienen con mucha frecuencia escapes en la unión de las dos partes del cojinete; se evita este inconveniente con un hilo de plomo que se coloca alrededor y que se aplasta al apretarlo (fig. 488).

El equilibrado en marcha se hace del modo siguiente:

Después de equilibrar cuidadosamente el rotor dejándolo girar (por efecto de un falso peso que hay que anular) sobre aristas vivas niveladas, se monta y se pone en marcha. El falso peso, si existe alguno, produce una vibración violenta de la máquina, causada por una ligera flexión del árbol, que hace que éste no gire bien en redondo. Apoyándose en un punto bien fijo, se

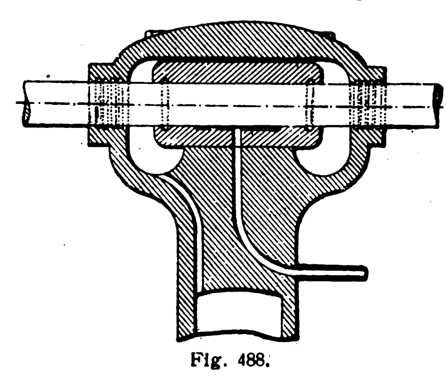


Fig. 488.

marca el punto que no gira alrededor de la prolongación del eje, y se equilibra el árbol según la señal obtenida.

Esta señal no da directamente el punto defectuoso; a causa de la inercia y de la gran velocidad angular, se produce una especie de retraso en la flexión. Se admite que, para 1500 vueltas, el falso peso está a 90° por detrás de la señal marcada en el árbol. Para 3000 vueltas, está a 180°.

Se puede determinar este ángulo de la manera siguiente: se mueve la máquina en un sentido y estando a la velocidad normal se hace una señal; se mueve después en sentido contrario y se hace otra señal: el punto defectuoso está a igual distancia de estas dos

señales y antes de ambas, es decir, sobre la bisectriz del ángulo resultante; luego bastará cargar en el punto diametralmente opuesto (figura 489).

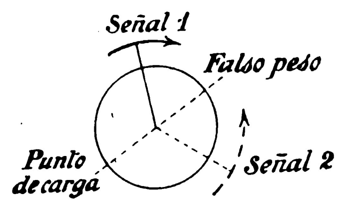


Fig. 489.

Hay además, cuando un rotor está bien equilibrado, un paso *crítico,* donde, por resonancia, se obtienen vibraciones violentas: este fenómeno se produce casi siempre a una velocidad aproximadamente superior a la de régimen en un tercio. No se debe continuar con esta velocidad porque la amplitud de las vibraciones va aumentando y se corre el peligro de torcer el árbol.

Transmisión por fricción

Este procedimiento de transmisión se emplea para pequeñas potencias, y sobre todo cuando se quieren

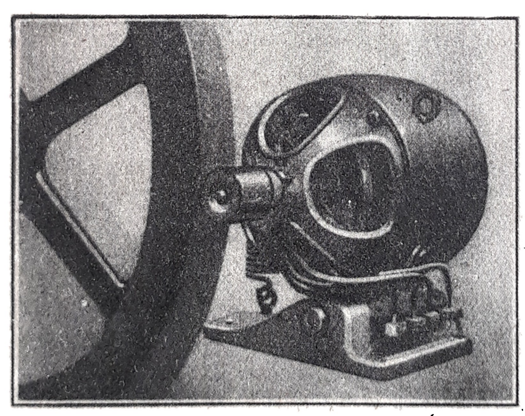


Fig. 490.

obtener grandes variaciones de velocidad (fig. 490).

Puede hacerse también la transmisión sobre la llanta inferior de la polea conducida; este procedi-

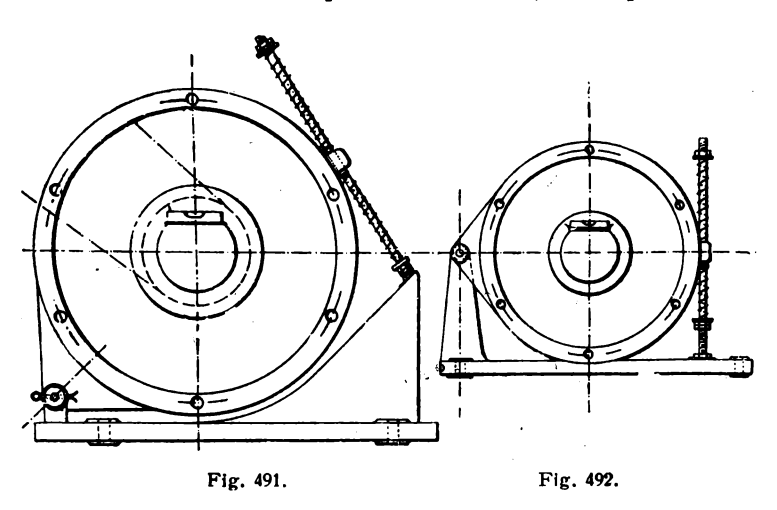


Fig. 491. Fig. 492.

miento tiene la ventaja de que siendo del mismo sentido la curvatura de las dos poleas, el fresado debido a las trepidaciones tiene mucho menos efecto.

La polea motriz se hace ordinariamente de cuero verde o de papel.

El motor está montado sobre una suspensión elástica (figs. 491 a 493).

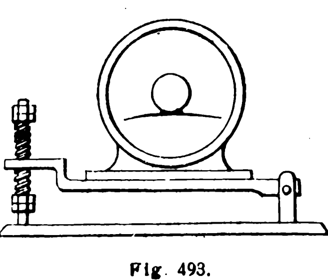


Fig. 493.

Cuando se quieren obtener grandes y rápidas variaciones de velocidad, se fija sobre el árbol del motor un rodillo o tambor *P* (fig. 494) que se apoya sobre un plato montado en el árbol conducido; moviendo *P* del centro del plato hacia el borde, se obtienen velocidades cada vez

menores. Es evidente que si el motor da n vueltas por segundo, el árbol conducido dará:

$$N = n \times \frac{r}{a}.$$

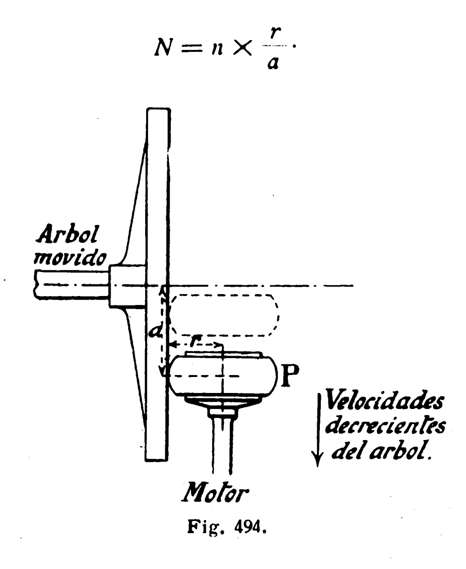


Fig. 494.

Transmisión por engranajes

Este modo de transmisión se aplica cuando los medios anteriores no convienen. Se emplean ordinariamente piñones de cuero verde o de fibra vulcanizada, que son muy convenientes para grandes velocidades, dan un funcionamiento silencioso, no necesitan engrase y constituyen un buen aislamiento eléctrico. Siempre van engranados a una rueda dentada metálica.

Cuadros de distribución

Los cuadros para motores tienen generalmente:

1.° Los aparatos de maniobra; interruptores a mano, por transmisión o a distancia;

2.° Los aparatos de protección;
3.° Los aparatos de arranque;
4.° Los aparatos de regulación;
5.° Los aparatos de medida.

En el caso de instalaciones a alta tensión, los aparatos sometidos a la misma, interruptores, etc., están fuera del cuadro de distribución de que son independientes, y se accionan a distancia. El cuadro no lleva entonces más que las palancas o volantes de gobierno y los aparatos de medida, recorridos por corrientes transformadas, de baja tensión. Los aparatos de seguridad son accionados a distancia por carretes recorridos por una corriente de otro generador, o por las corrientes transformadas a baja tensión.

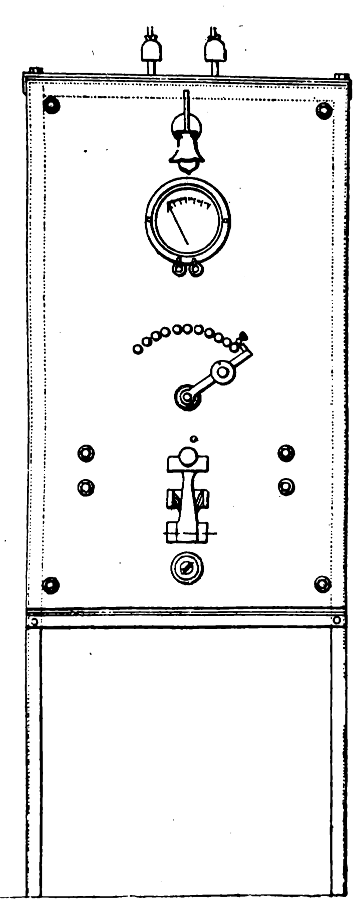


Fig. 495.

Ejemplo. — Cuadro para un motor de corriente continua (figs. 495 y 496).

1.° Aparatos de mando

El mando de los motores, es decir, el cierre o la apertura del circuito que los alimenta, puede hacerse localmente o a distancia.

El mando local consiste sencillamente en maniobrar un interruptor.

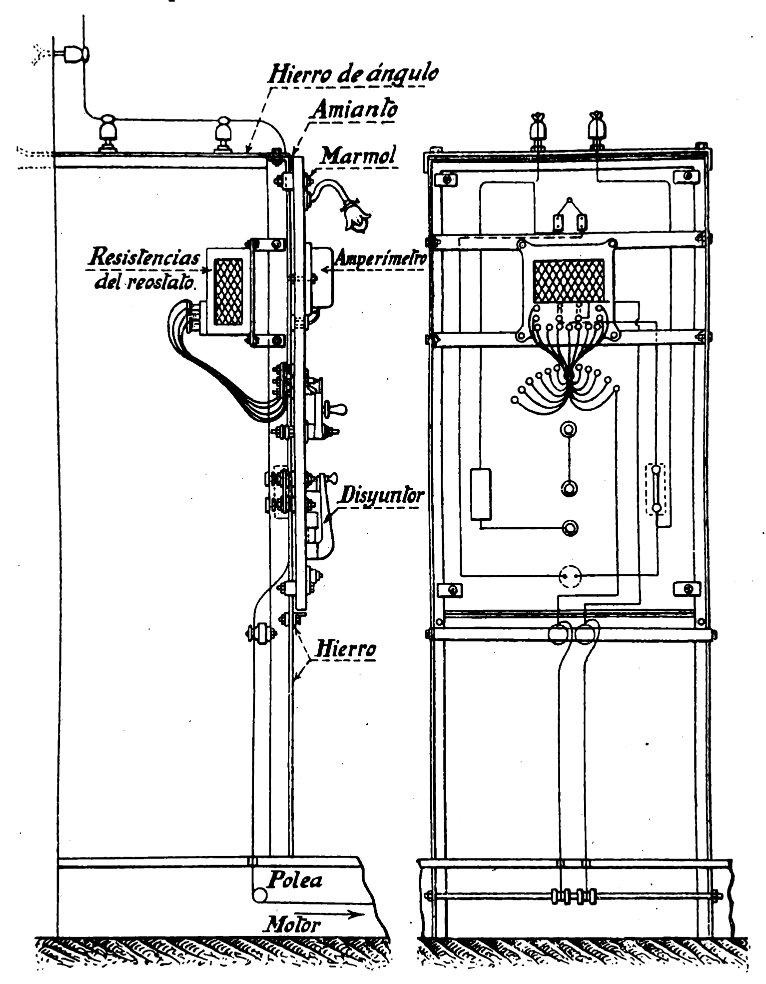


Fig. 496.

Los interruptores son bipolares para los motores de corriente continua y de corrientes alternas monofási-

cas, y tripolares para las corrientes trifásicas. Cuando la corriente a que están destinados es de gran intensidad, van provistos de parachispas; cuando las láminas del interruptor abandonan los contactos, la corriente sigue pasando durante un tiempo muy corto por los

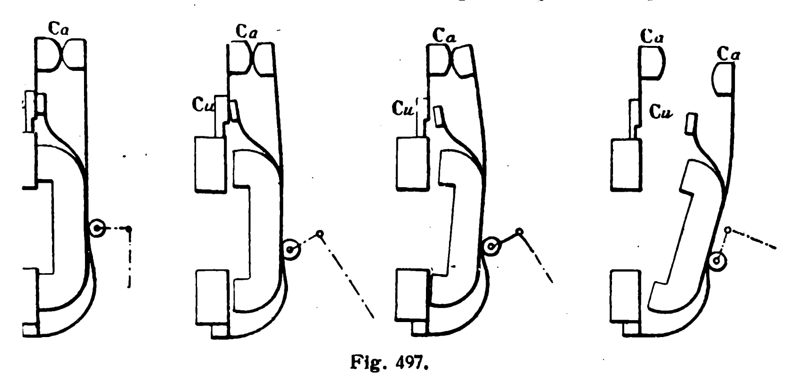


Fig. 497.

contactos de ruptura, fácilmente intercambiables, y en general de carbón o de zinc (fig. 497).

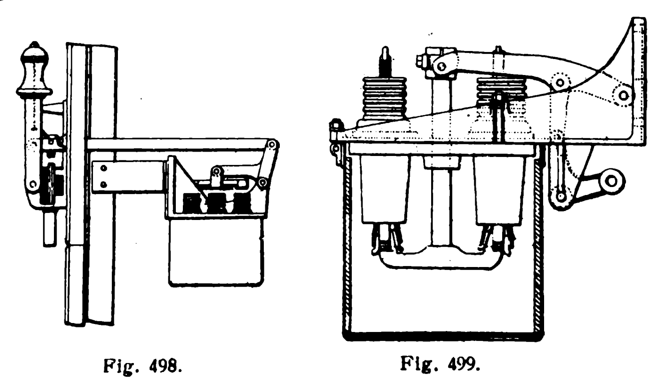


Fig. 498. Fig. 499.

Para las altas tensiones, se emplean interruptores de aceite (figs. 498 a 500). El aceite que se emplea en estos aparatos es aceite mineral pesado, siendo preciso filtrarlo de vez en cuando.

La duración de un baño de aceite está dada aproximadamente por las siguientes cifras (Vedovelli y Priestley):

Hasta	1000 volts	2000 rupturas
»	2000 »	1000 »
»	5000 »	500 »
»	10000 »	200 »

para el caso en que los contactos queden en el aceite.

Cuando los contactos salen del aceite, el número de rupturas puede triplicarse.

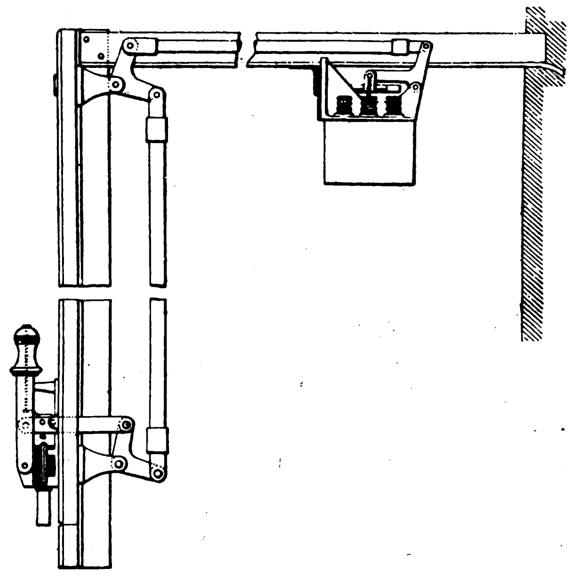


Fig. 500.

Para el mando a distancia se emplean *contactores*.

Un contactor es un interruptor mandado por un electroimán; la bobina de este electroimán es, en general, alimentada por el mismo manantial que el motor.

Para producir la apertura o el cierre del contactor basta abrir o cerrar el circuito de excitación de su

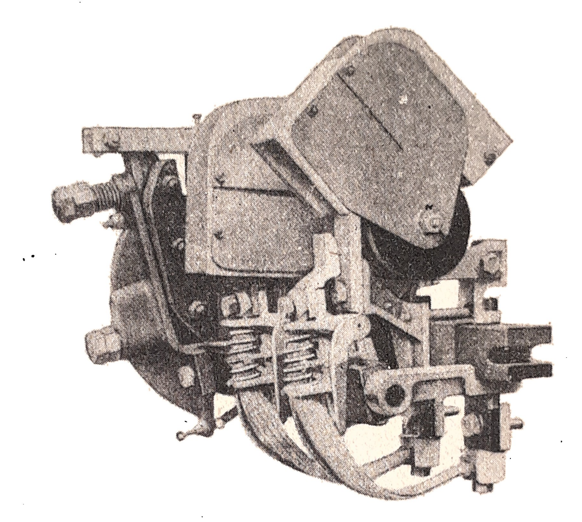


Fig. 501. — Contactor bipolar para 80 amperes y corriente continua, de *La Télémécanique électrique*.

bobina, lo cual solamente exige hilos de pequeña sección y, por tanto, puede hacerse económicamente a distancia.

Hay dos esquemas distintos del circuito auxiliar de un contactor.

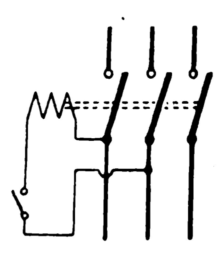


Fig. 502.

En el primero (fig. 502), que necesita tan sólo dos hilos de unión, el contactor es mandado por un interruptor o por botones que permanecen en la posición de cierre o de apertura en que los ha colocado el operador. Este montaje se emplea más especialmente cuando el interruptor es desengatillado por el fenómeno que se ha de controlar (interruptor de flotador, manómetro de contacto, termómetro, reloj, etc.).

El segundo montaje (fig. 503) permite el mando a distancia mediante botones de presión que por lo demás

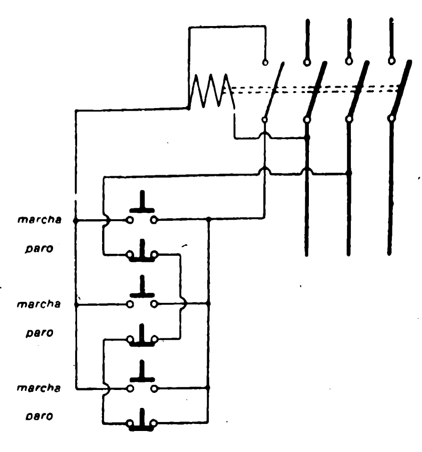


Fig. 503.

pueden colocarse en varios sitios distintos. Por consiguiente es posible multiplicar en la medida que sea necesario las estaciones de mando.

En el montaje son necesarios tres hilos de unión.

2.° Aparatos de protección

Los motores deben estar protegidos por una parte contra las sobreintensidades y por otra parte para que no se pongan bajo tensión cuando los aparatos de arranque no estén al cero (lo que es causa asimismo de una sobreintensidad).

1.° Protección contra las sobreintensidades directas.

Es preciso distinguir entre las grandes sobreintensidades y las sobreintensidades débiles pero de larga duración.

A. **Sobreintensidades fuertes.** — En este caso la puesta fuera de circuito del motor debe ser instantánea.

Pueden emplearse fusibles, un disyuntor o un contactor-disyuntor.

a) *Fusibles.* — Salvo para las instalaciones muy pequeñas, los fusibles no se emplean nunca como única protección. En efecto, su calibrado es muy difícil: en el caso de grandes intensidades, la masa del fusible es bastante grande, de modo que la intensidad de la corriente que produce la fusión depende de la temperatura a que se encuentra dicha masa en el momento de pasar la intensidad del valor admitido, y por consiguiente del régimen anterior. Si el motor funcionara a plena carga, el fusible estaría, en el momento de la sobrecarga, a una temperatura más alta que si la carga no fuera tan grande, y se fundiría más pronto.

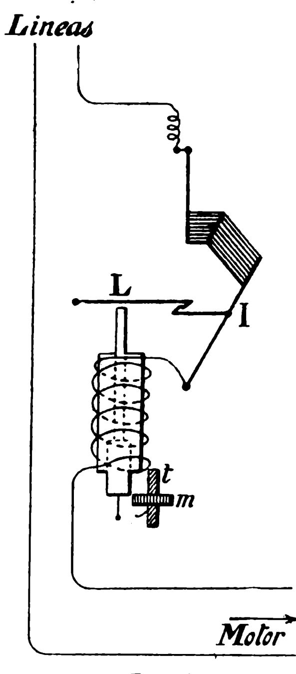


Fig. 504.

Además, el cambio de fusible requiere un cierto tiempo que retarda la puesta en marcha del motor, aunque se pueden utilizar cartuchos que se cambian muy rápidamente, pero entonces el precio de este cortacircuito es bastante elevado tratándose de grandes intensidades.

Por último, la duración de la desconexión no es regulable.

Por este motivo, en general, no se utilizan como no

sea conjuntamente con otros aparatos de protección, con objeto de hacer frente a cualquier falla eventual de estos últimos.

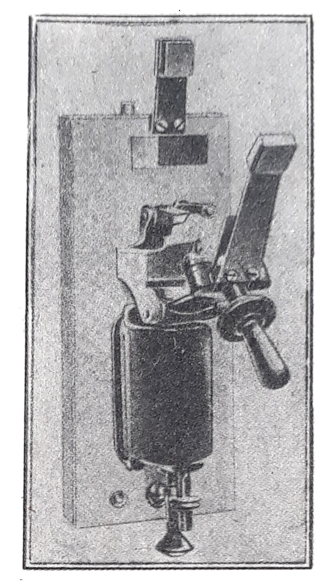


Fig. 505.

b) *Disyuntores.* — Los disyuntores de máxima son aparatos, generalmente magnéticos, que permiten cortar automáticamente un circuito así que la intensidad de la corriente alcanza un valor dado.

Estos aparatos están formados por un electroimán recorrido por la corriente que alimenta el motor (fig. 504). Cuando la corriente alcanza un valor determinado, el núcleo se eleva y levanta una palanca *L* que, normalmente, mantiene cerrado el interruptor *I*; la lámina del interruptor se separa en virtud de su peso, o por un muelle, y la corriente queda cortada.

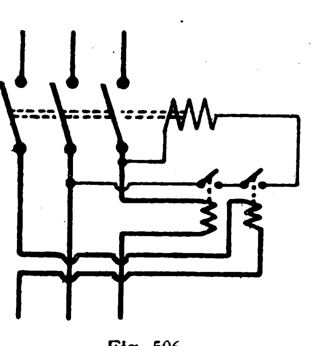
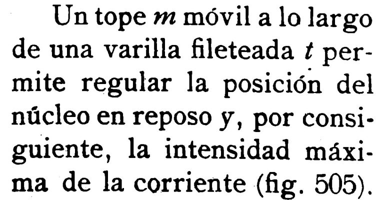


Fig. 506.



Un tope *m* móvil a lo largo de una varilla fileteada *t* permite regular la posición del núcleo en reposo y, por consiguiente, la intensidad máxima de la corriente (fig. 505).

En el caso de motores de corrientes alternas de alta tensión, los carretes de los disyuntores están alimentados por una corriente reducida mediante un transformador de intensidad (fig. 506).

Los disyuntores son a menudo de *engatillamiento impedido,* es decir, tienen un dispositivo mecánico que impide cerrarlos mientras no haya desaparecido la causa que ha producido el desengatillamiento.

c) *Contactores-disyuntores.* — Un contactor-disyuntor es un contactor mandado por un relevador.

De manera general, se llama relevador a un aparato que por la acción de la corriente abre o cierra un contacto.

A menudo los relevadores están constituídos por un electroimán de núcleo móvil; se envía una corriente a la bobina (circuito auxiliar), la cual al subir el núcleo produce el cierre o la apertura del circuito que ha de mandar (circuito principal).

Para utilizar los relevadores en la protección de los motores se combinan con los contactores: el circuito auxiliar del relevador está montado en serie con el motor y, por lo tanto, es recorrido por la corriente total, y el contacto del relevador está montado en serie con la bobina del contactor.

Así que la corriente excede de un valor determinado, el relevador entra en acción, corta el circuito de la bobina del contactor y éste se desengatilla.

B. **Sobreintensidades débiles pero de larga duración.** — Los circuitos que llevan los motores están a menudo sujetos a sobreintensidades pasajeras, especialmente en el momento del arranque; no es preciso que los aparatos de protección se desengatillen así que se producen estas sobreintensidades, pues sólo son peligrosas cuando se prolongan durante bastante tiempo.

El desengatillamiento de los disyuntores no debe, pues, ser instantáneo, sino tanto más retartado cuanto menos fuerte sea la sobreintensidad.

Se llega a este resultado empleando relevadores térmicos o relevadores magnéticos diferidos.

a) *Relevadores térmicos.* — Son del tipo de doble lámina, descritos en páginas anteriores.

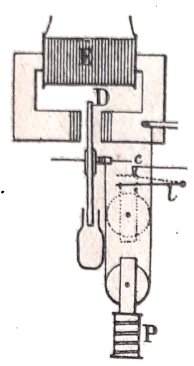
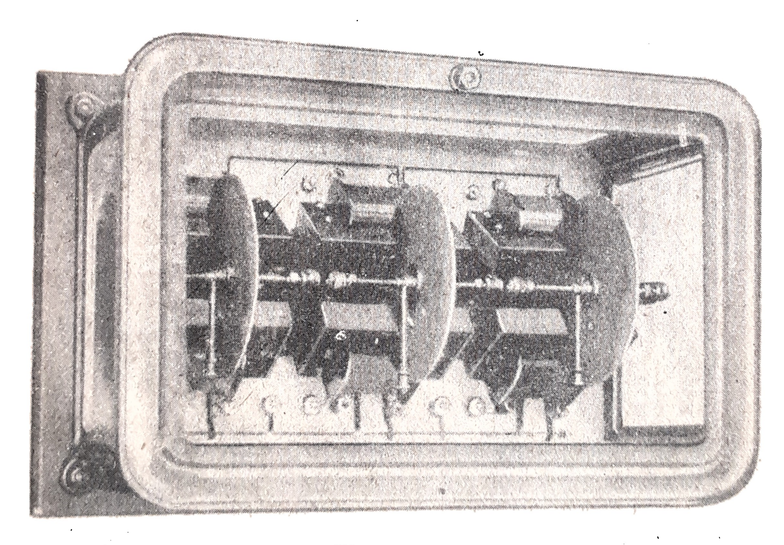


Fig. 507.

b) *Relevadores magnéticos diferidos.* — Describiremos los aparatos construídos por la «Compagnie électro-mécanique», pues su descripción y el estudio de su funcionamiento permiten comprender el funcionamiento de cualquier otro tipo.

Estos aparatos están formados por un electroimán *E* (figuras 507 y 508) alimentado por el secundario de un transformador *T*, cuyo primario es recorrido directamente por la corriente del motor; en los extremos polares hay colocados unos anillos de cobre cerrados en corto-


Fig. 508.

circuito. Estos anillos son recorridos por corrientes

inducidas en cuadratura con las corrientes que recorren el carrete *E*. Entre los polos puede girar un disco de aluminio *D*, sobre cuyo eje se arrolla uno de los ramales de un hilo de seda, del que pende un peso *P*. Las corrientes en el carrete *E* y en los anillos, defasadas 90° entre sí, dan lugar a dos campos, también en cuadratura, que dan como resultante un campo giratorio que tiende a mover el disco *D* en su misma dirección. Pero el hilo

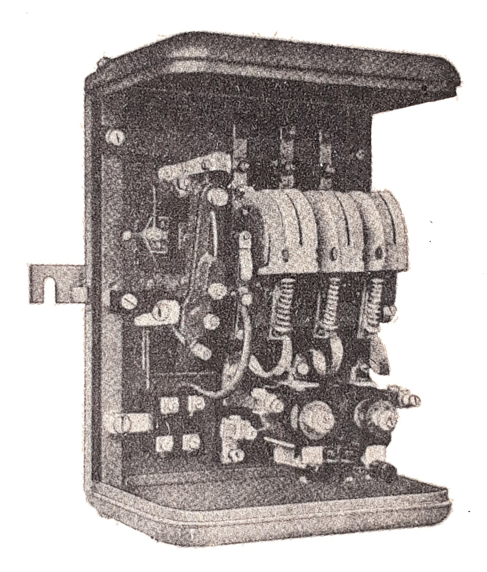


Fig. 509. — **Contactor-disyuntor para 20 amperes, de *La Télémécanique électrique*. Realiza a la vez la protección diferida para sobrecargas débiles y la instantánea para sobrecargas fuertes, mediante relevadores magnetotérmicos.**

del contrapeso *P* está arrollado en un sentido tal, que el par que produce es de sentido opuesto al par electromagnético desarrollado por el disco. Este par crece al principio al mismo tiempo que la corriente en el carrete *E* y, por consiguiente, al mismo tiempo que la corriente en el motor; cuando alcanza un valor igual al del par pro-

ducido por P, éste es arrastrado hacia arriba y va a dar contra una lámina flexible l, que se apoya entonces sobre un contacto c, cerrando el circuito de un generador de

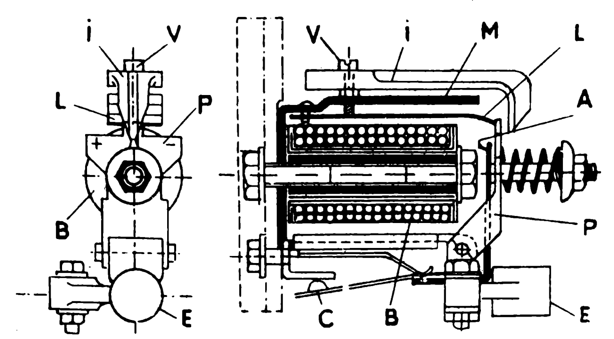
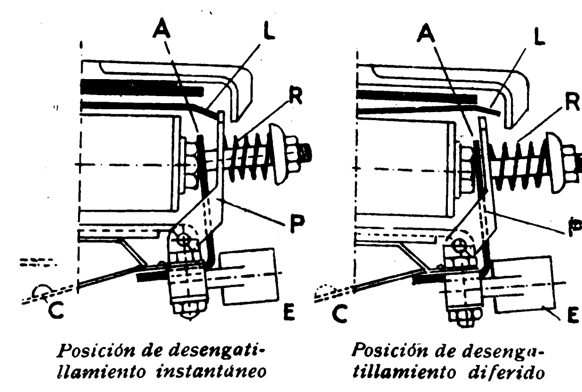


Fig. 510. — Vista de frente y sección de un relevador magnetotérmico en la posición de marcha normal.

corriente continua, una batería de acumuladores por ejemplo, sobre el carrete del electroimán B de escape del interruptor (figura 512).



Posición de desengatillamiento instantáneo — *Posición de desengatillamiento diferido*

Fig. 511. — Relevador magnetotérmico en acción.

Variando la longitud del hilo de suspensión, se puede regular el tiempo que ha de tardar el interruptor en romper el circuito a partir del momento en que

la corriente alcanza su valor máximo. Un imán permanente hace que el movimiento sea aperiódico.

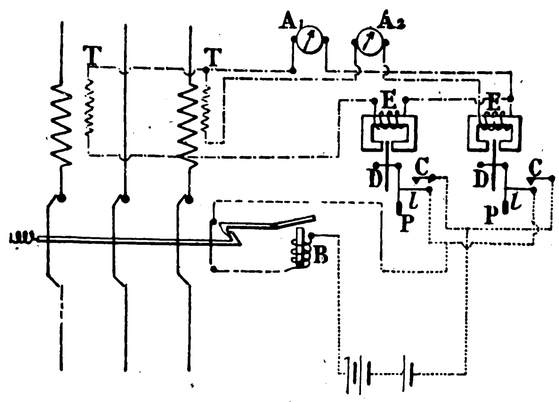


Fig. 512.

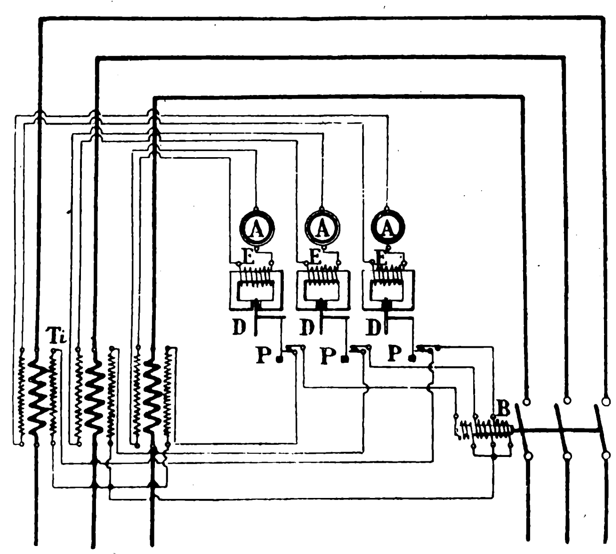


Fig. 513.

Si no se dispone de corriente continua, los electro-

imanes de escape se alimentan por los secundarios de transformadores de intensidad, cuyos primarios están en las líneas de alimentación del motor (fig. 513).

2.° PROTECCIÓN CONTRA LA FALTA DE TENSIÓN

Puede suceder que la corriente que alimenta los motores quede interrumpida por cualquier causa (pana en un sector, etc.). Es preciso que la corriente no pueda restablecerse sin que los reostatos de arranque hayan sido llevados previamente al cero. Para ello el motor debe estar automáticamente aislado de la red así que ésta ya no da tensión. Esta es la finalidad de las bobinas «de falta de tensión». Estas bobinas están montadas en derivación sobre la red y llevan un núcleo móvil de mando del interruptor. Si la tensión cae, el núcleo baja y hace desengatillar el interruptor.

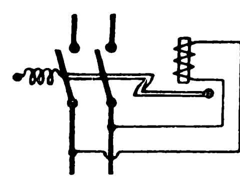


Fig. 514.

Haremos observar que un contactor realiza por sí mismo la protección contra la falta de tensión, puesto que se desengatilla cuando su bobina deja de ser excitada.

3.° RELEVADORES DE CORRIENTE DE INVERSIÓN

Estos relevadores se utilizan en el caso en que se emplean motores sincrónicos que trabajan con otros motores, motores mecánicos por ejemplo. Si por una razón cualquiera la corriente se interrumpe en el motor sincrónico, se puede mover como generador y enviar corriente a la red. Para evitar esto se dispone en el circuito de alimentación del motor un relevador de inversión de corriente, que hace que el interruptor se abra en cuanto la corriente tiende a invertirse.

El disco de aluminio está sometido a la acción de los campos alternos producidos por dos carretes de electroimanes B, B'. Los primeros, B, están recorridos por las corrientes de los secundarios de transformadores de tensión T_t, T_t, en cuadratura con las tensiones entre las líneas; los segundos, B', están recorridos por las corrientes de los secundarios de transformadores de intensi-

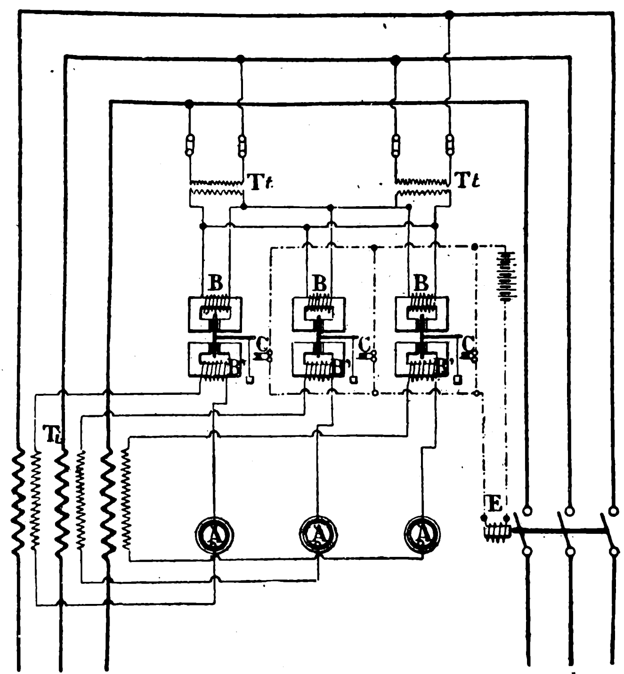


Fig. 515.

dad T_i, en fase con las corrientes de alimentación (figura 515). Por consiguiente, las corrientes en los carretes B y B' y, por lo tanto, los campos producidos, están defasados entre sí 90°, resultando un campo giratorio que cambia de sentido cuando se invierte la corriente.

En marcha normal, el par electromagnético desarrollado en el disco es del mismo sentido que el producido por el peso, y el disco se para por un saliente

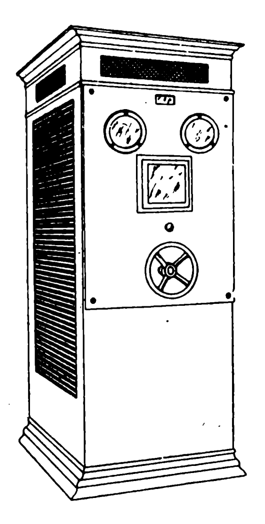


Fig. 516. — Cuadro de distribución de un motor con interruptor de aceite y disyuntor con relevador.

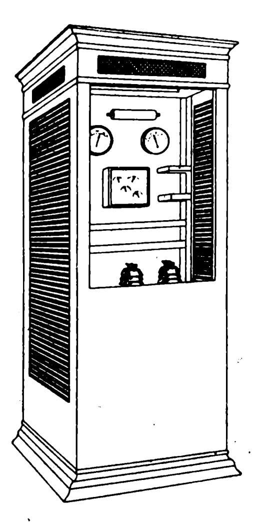


Fig. 517. El mismo cuadro anterior, visto por dentro.

con que choca el peso, y los contactos *C* permanecen separados; si la corriente se invierte, los discos se mueven y los contactos *C* establecen la corriente en el electroimán *E*, produciéndose el escape del interruptor.

3.° Aparatos de arranque

Los aparatos de arranque son reostatos generalmente metálicos que se manejan a mano o a distancia. Para pequeñas potencias se emplean a veces aparatos de palanca para el arranque (figs. 518 y 519). La figura 518 representa el arranque en dos tiempos de un

motor trifásico: en el primer tiempo la corriente pasa por *a*, *b*, *c* y no por los cortacircuitos; en el segundo

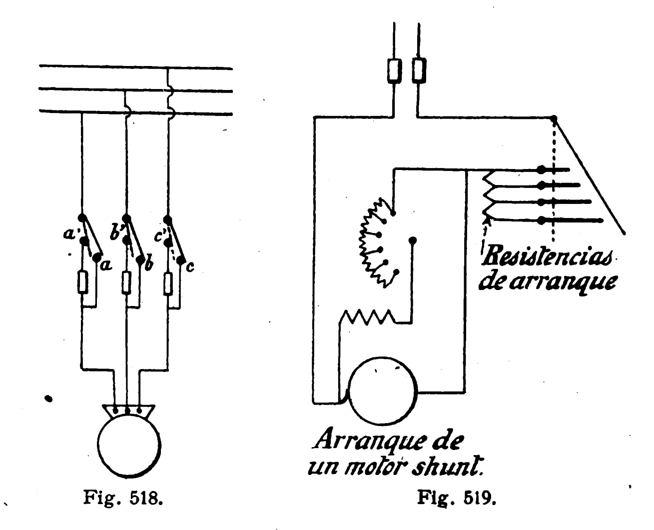


Fig. 518. Fig. 519.

tiempo la corriente normal de marcha pasa por *a'*, *b'*, *c'* y por los cortacircuitos.

En el caso de gran potencia, conviene a veces recurrir a los reostatos líquidos.

El baño es de fundición o de madera forrada de plomo. El líquido es agua pura si la tensión es muy alta; para bajas tensiones, se hace conductor el líquido echándole un poco de carbonato sódico (nunca ácido sulfúrico). Las láminas metálicas que entran en el líquido son de latón o de cobre ligeramente estañado.

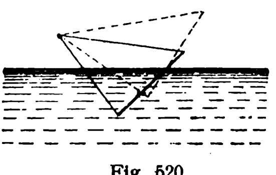


Fig. 520.

Las variaciones de resistencia se obtienen: moviendo las dos láminas en el líquido, moviendo una sola lámina o también dejando inmóviles las dos y haciendo subir más o menos el

líquido en el baño, que tiene una forma especial. Las láminas tienen forma triangular, y giran alrededor de un vértice *O* (fig. 520). Por efecto de la electrolisis, en el caso de corriente continua, una de las láminas es atacada y se gasta muy pronto.

Este tipo de reostato permite cortar un circuito en $^1/_{10}$ de segundo, aun para una tensión de 2000 a 3000 volts.

4.° Aparatos de regulación

Cuando se quiere variar la velocidad, se dispone en el cuadro un aparato de regulación: regulador de inducción para las máquinas de corriente continua; conmutador que regula la tensión de un transformador o de un autotransformador para algunos motores de corriente alterna; reostato en el rotor, etc.

Sección de los conductores

La sección de los conductores que alimentan los motores se calcula como ya dijimos para el alumbrado; pero la caída de tensión admitida puede tomar un valor mayor, y lo importante es que la densidad de corriente sea la que conviene.

I. **Motores de corriente continua.** — *Línea principal.* — Sean *P* caballos la potencia del motor y *U* volts la tensión de alimentación. La corriente *I* en las líneas está dada por la relación:

$$UI = P \times 736,$$

de donde:

$$I = P \times \frac{736}{U}.$$

Admitiendo para densidad de corriente los valores dados en la página 137, se calcula fácilmente la sección de los conductores.

Las tensiones ordinariamente empleadas son:

$$110,\ 220,\ 440 \text{ volts};$$

ahora bien,

$$\frac{736}{110} = 6{,}7, \quad \frac{736}{220} = 3{,}4, \quad \frac{736}{440} = 1{,}7.$$

La corriente en las líneas se obtiene, pues, multiplicando el número que mide la potencia tomada por el motor y expresada en caballos, por 6,7, 3,4 ó 1,7 según la tensión sea de 110, 220 ó 440 volts.

Línea del circuito de excitación. — Si se puede medir la resistencia, R ohms, del circuito inductor, la corriente de excitación tiene por valor: $i = \frac{U}{R}$ amperes.

Esta corriente tiene un valor muy pequeño, que varía de $^1/_{10}$ aproximadamente de la corriente total para las máquinas de muy poca potencia, a 0,5 $^0/_0$ para las grandes máquinas.

Si se calcula la sección dándose la densidad de corriente, según la tabla de la página 137, se llegará a obtener un conductor de muy poco diámetro y se deberá emplear un hilo más grueso, para mayor seguridad.

Es conveniente no tomar nunca estos conductores de diámetro inferior a $\frac{16}{10}$.

II. **Motores trifásicos.** — *Sección de las líneas.* — Sean P caballos la potencia absorbida por el motor y

cos φ su factor de potencia, U la tensión entre líneas e I la corriente en las líneas. Se sabe que:

$$UI\sqrt{3}\cos\varphi = P \times 736,$$

de donde:

$$I = P\frac{736}{U\sqrt{3}\cos\varphi} = \frac{P}{U}\cdot\frac{736}{1{,}73\cos\varphi}\cdot$$

Si se admite para cos φ el valor 0,8, la expresión

$$\frac{736}{U \times 1{,}73\cos\varphi}$$

toma para $U = 110$, $U = 220$, $U = 440$, los valores:

4,84, 2,42, 1,21.

Por lo tanto, la corriente en las líneas se obtiene, con una aproximación suficiente para el cálculo de su sección, multiplicando el número que mide, en caballos, la potencia tomada por el motor, por uno de los números:

4,84, 2,42 ó 1,21,

según la tensión de alimentación sea:

110, 220 ó 440 volts.

Sección de los conductores que unen los anillos al reostato de arranque. — Si el motor tiene dispositivo para levantar las escobillas, la corriente no pasa por los conductores más que durante el arranque, que en general dura muy poco tiempo, y basta tomar una sección tal que los conductores no se calienten durante este tiempo. Es preciso, para

no influir sobre el par de arranque, que la resistencia de los conductores sea bastante pequeña en relación con la del reostato.

Si no se pueden levantar las escobillas, el aparato de arranque forma el cortocircuito, y los conductores están constantemente recorridos por la corriente del rotor, siendo preciso calcular las dimensiones convenientes. Para ello, es necesario conocer el valor de la corriente en el rotor y por consiguiente la relación de transformación: si la relación es t, siendo I_1 la corriente en el estator y por lo tanto en las líneas, la corriente en el rotor es I_2, y se puede escribir:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{t}, \quad \text{de donde} \quad I_2 = t \times I_1.$$

Para hallar la relación de transformación t, se monta el rotor y se alimenta el estator bajo una tensión dada U_1. Un voltímetro derivado entre los anillos del rotor da una tensión U_2; la relación de transformación tiene por valor:

$$t = \frac{U_1}{U_2}.$$

Colocación de las líneas

Las líneas que alimentan los motores se colocan del mismo modo que para el alumbrado (capítulo VI). Cuando el motor o los aparatos de gobierno y regulación están fijos en la máquina accionada, es muy cómodo poner los conductores bajo tubos, como indican las figuras 521 y 522.

Pero lo más frecuente es que los conductores pasen por poleas o campanas. Estos aisladores están sujetos con armadura de hierro, cuyas dimensiones

se hallan determinadas por el número y los diámetros de los cables y cuya forma depende del local y de las diferentes secciones que deben tomar los conductores.

En realidad cada jefe de taller da la forma y dimensiones que cree más convenientes, según las circunstancias particulares de cada caso. Es imposible indicar las formas que se deben emplear aun en las condiciones más corrientes y mejor definidas. Lo más que se puede

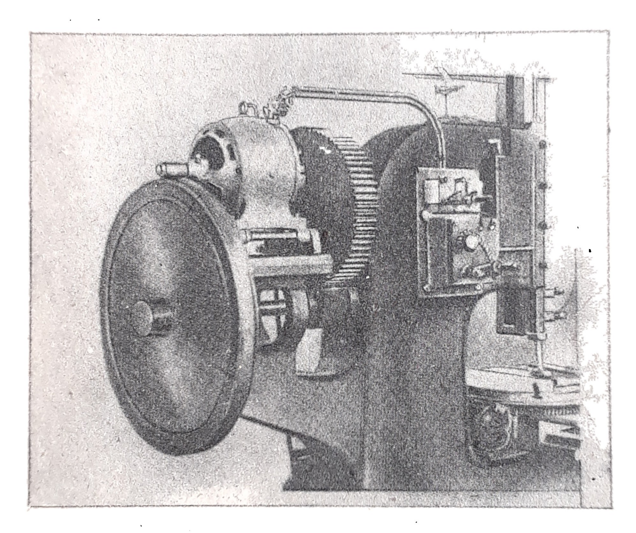


Fig. 521.

hacer es dar algunas reglas generales que pueden guiar al montador, y sobre todo se puede decir que hay que preocuparse:

1.° De no emplear más materiales que los que se encuentran ordinariamente en el comercio;

2.° De tener en cuenta que los montajes hay que hacerlos a veces lejos de talleres y por consiguiente con las herramientas que se lleven;

3.° De prever las modificaciones que puedan introducirse en la instalación después de hecha.

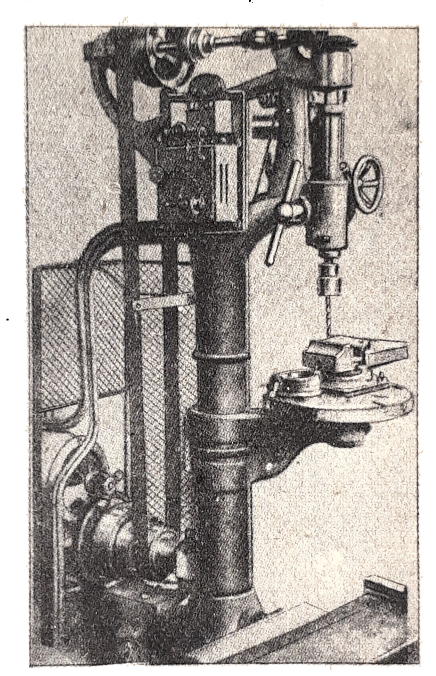


Fig. 522.

I. Los materiales son los hierros, poleas y campanas. Los hierros utilizados ordinariamente son:

Hierros planos:

Ancho	Espesor
30 mm.	5 mm.
40 »	5 »
40 »	7 »
40 »	11 »
50 »	9 »
50 »	11 »
60 »	9 »
60 »	11 »

Hierros cornisas (fig. 523):

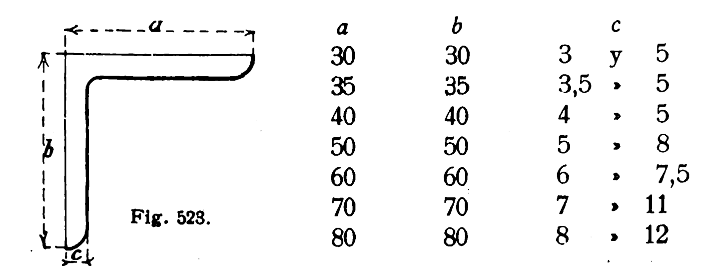


Fig. 523.

a	*b*	*c*
30	30	3 y 5
35	35	3,5 » 5
40	40	4 » 5
50	50	5 » 8
60	60	6 » 7,5
70	70	7 » 11
80	80	8 » 12

Se emplean mucho para soportar las planchas de mármol de los cuadros de las cornisas de alas desiguales (figura 524).

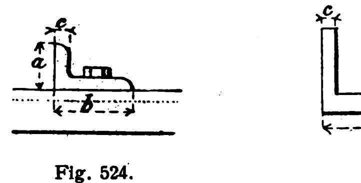


Fig. 524.

Fig. 525.

Hierros en **U** (fig. 525):

a	*b*	*c*
20 mm.	10 mm.	3 mm.
40 »	20 »	4 »
50 »	25 »	5 »
60 »	30 »	6 »

Hierros redondos. — Son las *consolas* o *soportes* sobre los cuales se fijan las campanas, cuyas formas están representadas por las figuras 526 a 529. Los diámetros son generalmente de

9, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25 milímetros.

Poleas. — Las poleas altas (fig. 530), de vidrio o de

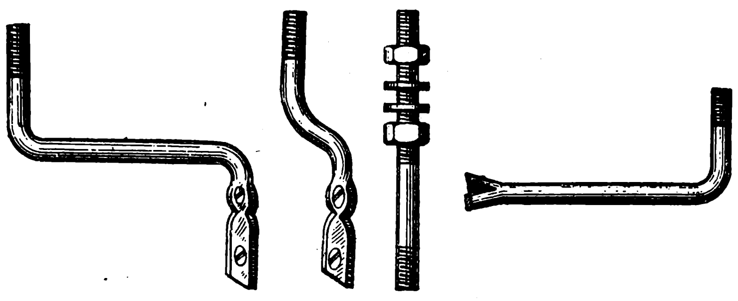


Fig. 526. Fig. 527. Fig. 528. Fig. 529.

porcelana, tienen en general las siguientes dimensiones aproximadas:

Altura *h* mm.	Diámetro *d* mm.	Agujero *t* mm.	Garganta g mm.
10	10	4	4
20	20	6	6
30	30	10	9
40	40	14	12
50	50	19	17

Se fijan sobre los hierros por medio de un perno y tuerca interponiendo una rodaja de hierro (fig. 531).

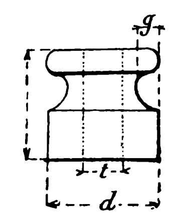


Fig. 530.

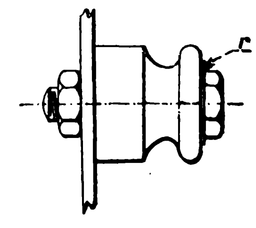


Fig. 531.

Campanas. — Son generalmente de vidrio o de porcelana (fig. 532), y se fijan en el extremo de las consolas, mediante yeso o cemento.

Fijación de las campanas. — Las campanas se atornillan sobre las consolas y después se colocan verticalmente de modo que no estén sometidas a ningún movimiento. Se prepara el yeso, empleando de 40 a 50 centilitros de agua con una cucharada de cola fuerte líquida o de goma arábiga, por kilogramo de yeso; se vierte después en la campana y se deja secar durante algunos días, teniendo cuidado de no moverlo el primer día. Es de la mayor importancia que el yeso no tape los filetes practicados en el fondo de la campana para facilitar la adherencia con las consolas (fig. 533).

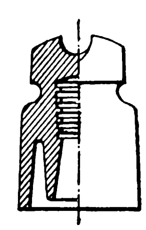


Fig. 532.

Fig. 533.

Se opera del mismo modo con el cemento, que se diluye en agua a razón de 40 centilitros a lo sumo por kilogramo de cemento, sin poner cola ni goma. Se deja más tiempo a secar que el yeso, hasta unos ocho días, sin removerlo durante los tres o cuatro primeros días.

A veces se fijan las campanas con azufre o litargirio, pero los aisladores han de ser de porcelana.

Dimensiones de los hierros y aisladores. — Las secciones que hay que dar a los hierros dependen de los esfuerzos que han de soportar y es posible calcularlas. Pero en realidad se sabe prácticamente el hierro que hay que emplear, según la sección del conductor y la extensión de las líneas. Por ejemplo, para los conductores de un solo hilo se emplean hierros de 4 a 6 milímetros hasta $^{20}/_{10}$, y a partir de este diámetro se emplean de 6 a 9 y de 20 a 35 milímetros; para los cables se toman hierros planos de 9 a 11 milímetros, y hierros cornisas y en U de 5 a 11 milímetros.

La anchura de los hierros debe ser igual o muy poco mayor que los diámetros de las poleas.

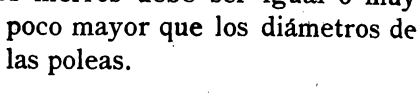


Fig. 534.

II. Para que se puedan hacer los montajes fácilmente sobre las mismas líneas, es conveniente emplear principalmente hierros en **U** y cornisas unidos con pernos, no debiéndose doblar en caliente más que los hierros planos.

Las campanas se montan sobre soportes rectos que se aprietan entre dos hierros en **U** sin tirantes. Estos hierros en **U** descansan sobre consolas de hierro plano fijadas a la pared (fig. 534). Así se pueden correr fácilmente las campanas a lo largo del espacio comprendido entre los hierros en **U** y colocarlas en la posición conveniente.

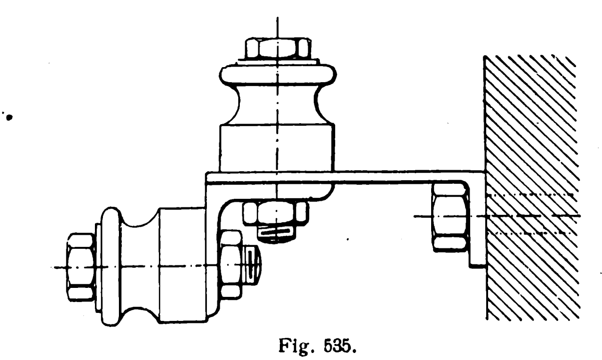


Fig. 535.

La figura 535 representa un hierro cornisa con dos poleas orientadas en dos direcciones perpendiculares.

En las figuras 536 a 539 se ve el empleo de hierros

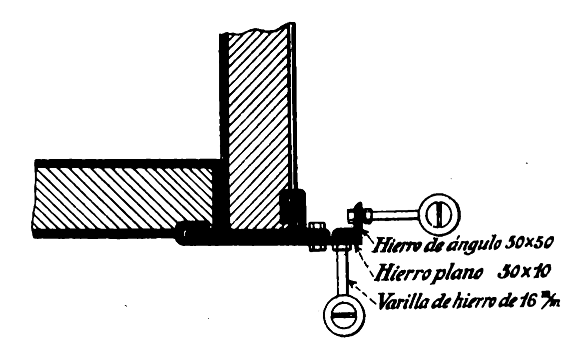


Fig. 536.

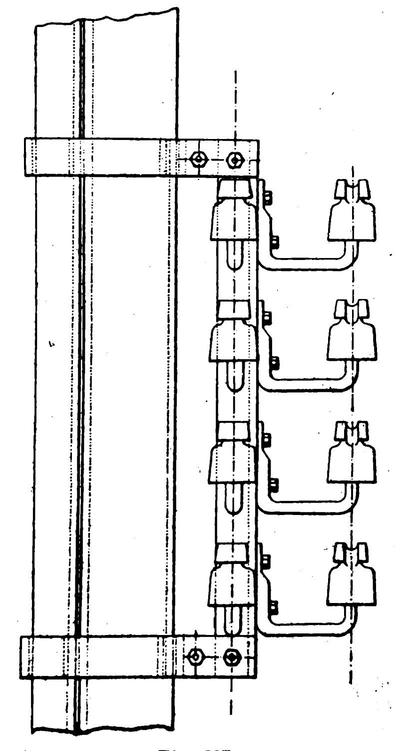


Fig. 537.

cornisas en una esquina de un edificio; las cornisas llevan las consolas de las campanas y están fijadas a las paredes a distancias convenientes mediante hierros planos.

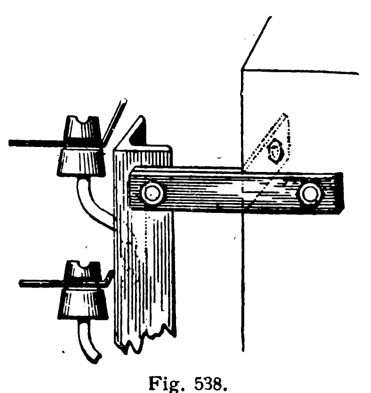


Fig. 538.

III. Cuando se hace una modificación en la instalación, es necesario a veces cambiar de sitio algunos hierros. Para evitar el deterioro excesivo de las paredes, es conveniente hacer los menos empotramientos que se pueda,

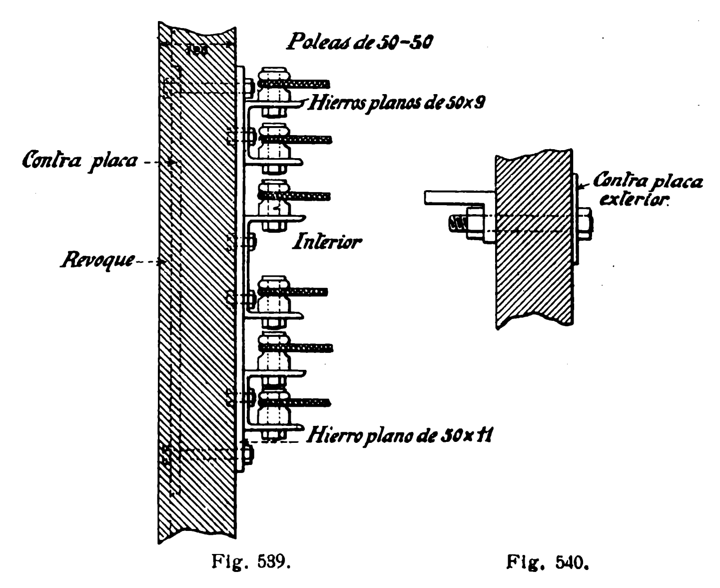


Fig. 539. Fig. 540.

fijándose los hierros por medio de pernos que atraviesan las paredes y que se aprietan mediante tuercas sobre las

contraplacas (fig. 540). El agujero puede tener un diámetro muy poco superior al del perno y se hace ordinariamente con una barrena, tapándose fácilmente.

En estas condiciones se pueden cambiar los hierros de sitio sin perjudicar mucho las paredes, lo cual no puede evitarse cuando los hierros están empotrados.

Colocación de los conductores. — Para tender los conductores se empieza por aflojar los pernos de fijación de los soportes de los aisladores y de los hierros,

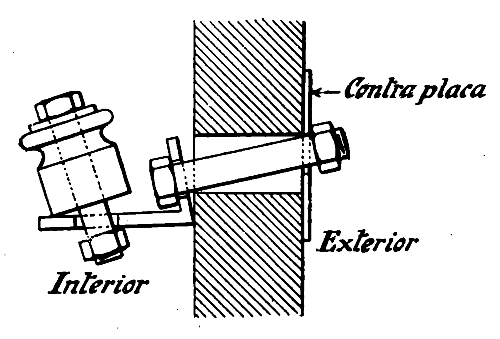


Fig. 541.

en los extremos de la línea y en los codos (fig. 541); después se fija el cable a la polea o a la campana por un extremo y se tiende a lo largo de los aisladores.

Los conductores se estiran con la mano o mediante una palanca y se fijan al último aislador; el cable, por muy fuertemente que se haya tendido, presenta siempre flechas bastante grandes, es decir, siempre queda algo flojo; se termina el tendido apretando los pernos que se habían aflojado al empezar.

Para fijar el cable o el hilo en sus extremos sobre una campana o sobre una polea, se desnuda el extremo del conductor en una longitud suficiente para dar sobre

sí mismo de ocho a diez vueltas; se mantiene el aislante sobre la garganta del aislador y se desnuda la parte situada al otro lado en la longitud necesaria para recibir las ocho o diez vueltas del extremo (figura 542). Después de haber arrollado dicho extremo, se recubre la parte desnuda con cinta aisladora.

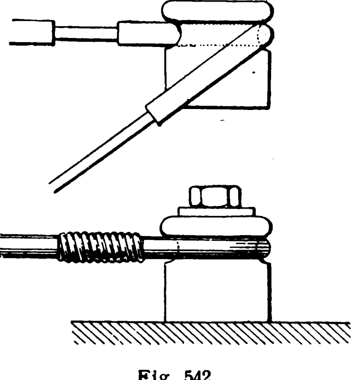


Fig. 542.

Si el conductor es un cable, no se puede proceder de esta manera, porque se produciría un abultamiento excesivo en el sitio de la ligadura; para evitarlo se opera del modo siguiente: se desarrollan en el extremo los hilos de la cubierta del cable y se cortan los ramales que forman

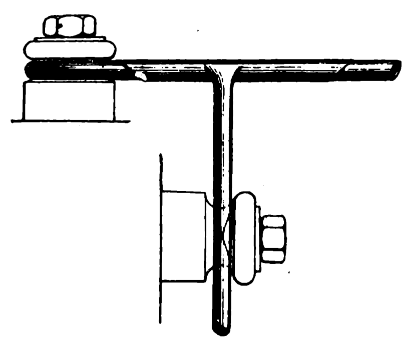


Fig. 543.

el ánima; se arrollan los ramales que quedan, convenientemente enderezados, alrededor de la parte del cable desnuda de antemano; así se dan dos o tres vueltas y se corta un ramal; se da otra vuelta y se corta

otro, y así sucesivamente, cortando un ramal a cada vuelta. De esta manera se obtiene una ligadura que va disminuyendo poco a poco de espesor, y que se cubre con cinta aisladora.

Cuando hay que hacer en un conductor un codo de 90°, es cómodo a veces fijarlo a un aislador un poco más allá de este codo, como hemos dicho, y se hace en seguida un empalme teniendo en cuenta las precauciones que acabamos de indicar (fig. 543).

Los empalmes de los hilos de gran sección y de los cables se hacen del modo indicado en las figuras 544 a 546.

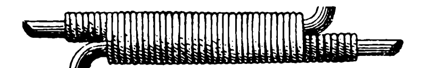


Fig. 544.



Fig. 545.

EJEMPLO I. — *Instalación de motores de inducción trifásicos* (fig. 547). — Los cables que llevan la corriente se sujetan por fuera del edificio en las campanas *C*, *C*, *C* fijadas a consolas fijas con pernos a una placa de hierro *P*, unida a su vez a dos placas P_1 y P_2 que se fijan, al mismo tiempo que las escuadras de hierro plano E_1 E_2 que soportan las poleas en el interior, por medio de pernos B_1 y B_2 que atraviesan la pared. Sobre las escuadras E_1 y E_2 hay colocados dos hierros cornisas que llevan las poleas sobre las cuales pasan los conductores al interior del edificio.

Sobre las poleas *A*, *A*, *A* se sujetan los conductores que pasan por delante de cada motor, de modo que los

cables exteriores e interiores están unidos entre sí por tres trozos unidos por sus extremos en *M* y *N*. Para que estos empalmes se puedan hacer en dos direcciones normales, los ejes de las poleas *A* están separados de

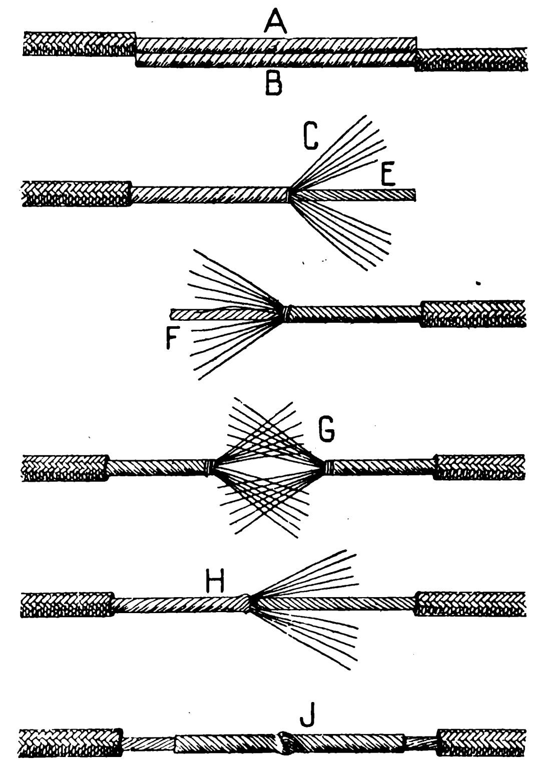


Fig. 546.

los ejes de las *B* correspondientes en una longitud igual al diámetro del cable.

Los cuadros se montan sobre marcos de hierros cornisas de 40 × 40 × 5 y sobre hierros planos de 40 × 5 y 45 × 5 (figs. 548 a 550).

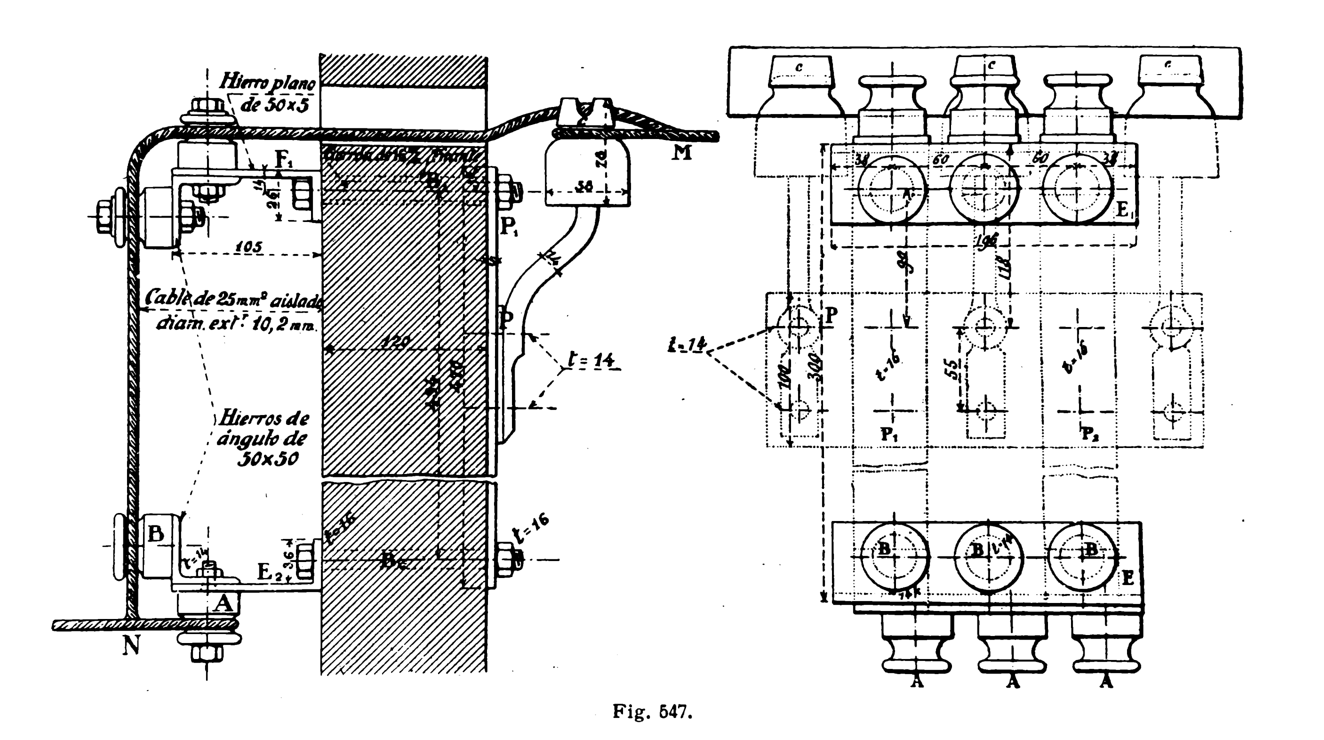

Hierro plano de 50×5
Cable de 25 mm² aislado
diam. ext.r 10,2 mm.
Hierros de ángulo de 50×50
105
120
M
N
A
B
E
P
P_1
P_2
F_1
E_2
t = 14
t = 16
196
300
100
55
38
60
118
92

Fig. 547.

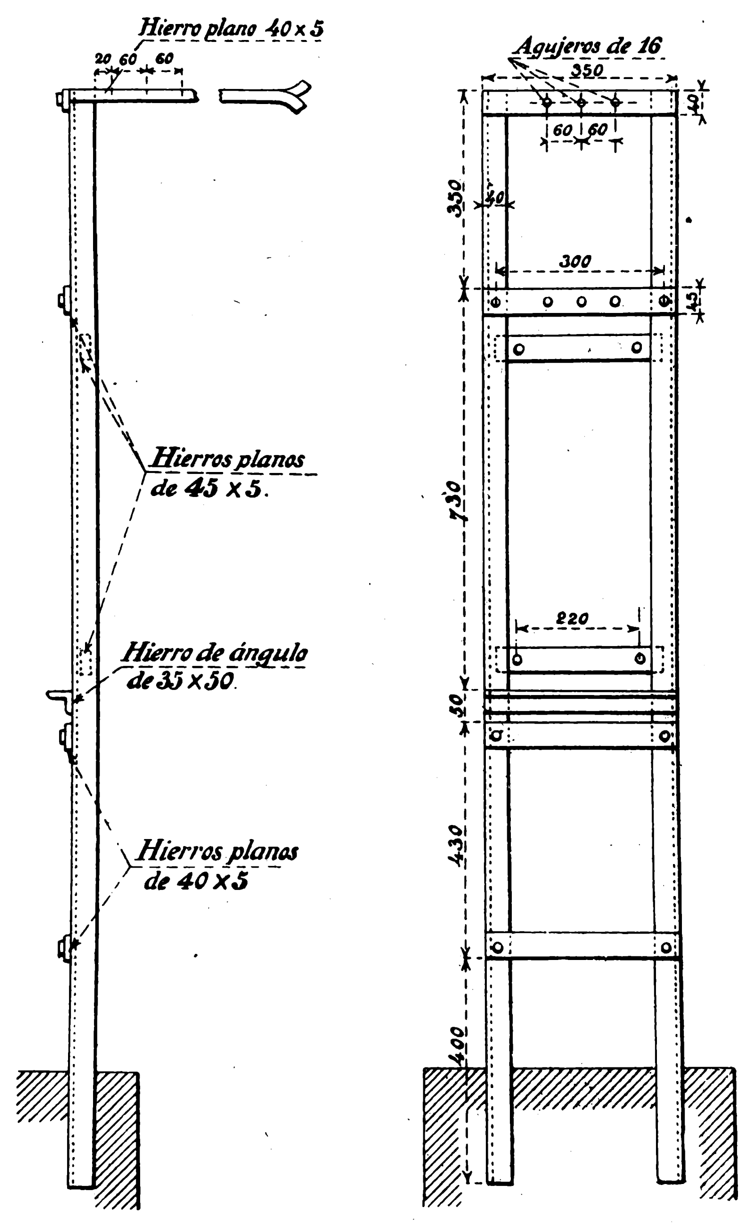


Fig. 548.

Fig. 549.

EJEMPLO II. — *Instalación de un motor trifásico alimentado por una línea de alta tensión* (fig. 551). — La tensión se reduce con un transformador.

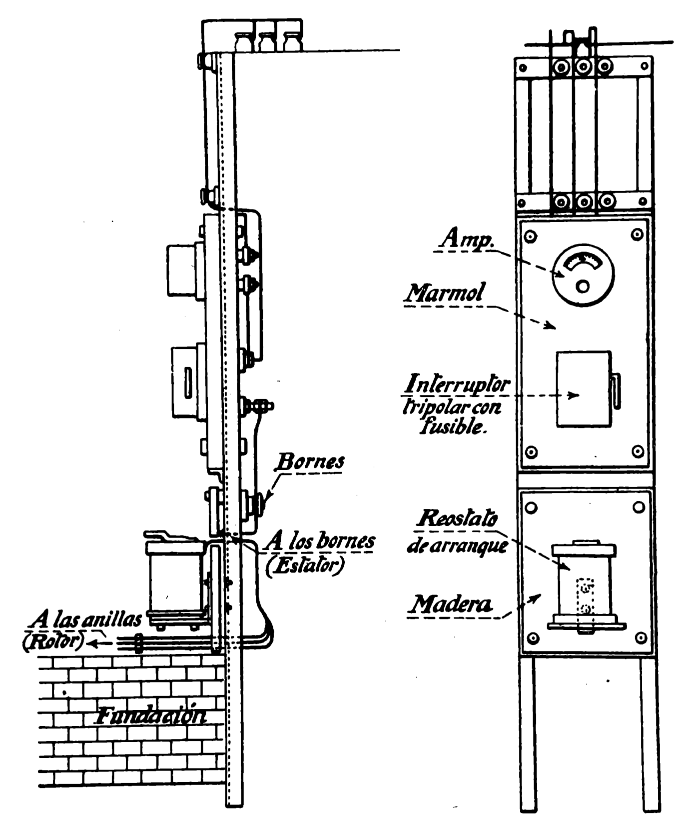


Fig. 550.

La línea llega sobre aisladores colocados en la parte superior de los hierros, pasa por los cortacircuitos, por un interruptor de aceite accionado desde el cuadro por palancas, y por el primario de un transformador de intensidad, cuyo secundario atraviesa el amperímetro

del cuadro y los carretes del relevador. Dos hilos derivados sobre una fase se unen al circuito primario de un transformador de potencial, cuyo secundario está unido

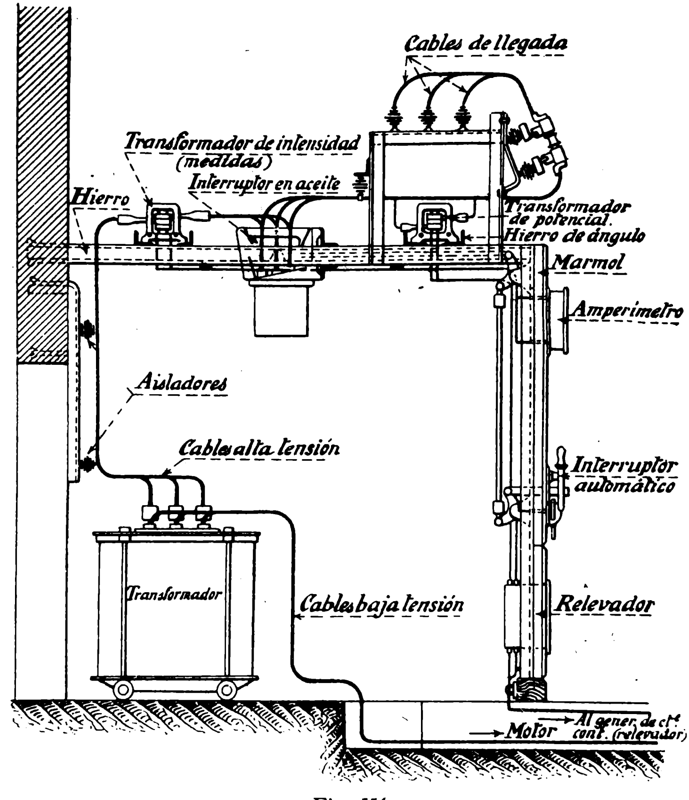


Fig. 551.

a los bornes del voltímetro del cuadro. Un generador de corriente continua alimenta, para la ruptura, los carretes del disyuntor del interruptor.

ÍNDICE

Págs.

CAPÍTULO PRIMERO

Timbres

CAPÍTULO II

Telefonía

CAPÍTULO III

Instalación de timbres y de teléfonos

CAPÍTULO IV

Distribución de la energía eléctrica

CAPÍTULO V

Instalaciones interiores de alumbrado

CAPÍTULO VI

Montaje de la instalación

CAPÍTULO VII

Electromotores de corriente continua

CAPÍTULO VIII

Motores de corriente alterna

CAPÍTULO IX

Instalación de motores

Práctica de la soldadura autógena, por S. FRANCHE y D. SÉFÉRIAN, ingenieros especialistas. Un volumen de 250 págs., de 19,5×12,5 cm., con 83 grabados.

Tratado de Telegrafía y Telefonía. *Guía para los empleados de Telégrafos y Teléfonos*, por el Dr. C. STRECKER. Un volumen de 696 págs., de 23×15 cm., con 535 grabados y esquemas.

Motores Diesel, por ORVILLE ADAMS, ingeniero. Un volumen de 600 págs., de 25×16 cm., con 335 grabados.

El motor de explosión, por E. PETIT, ingeniero. 4.ª ed., traducida de la 9.ª edición francesa revisada por el ingeniero J. MOHR. Un volumen de 528 págs., de 18×13 cms., con 250 grabados.

Dibujo de máquinas, por W. POHL. 2.ª ed., Un volumen de 246 págs., de 22×14,5 cm., con 345 grabados.

Guía del ajustador y del montador. *Estudio de las herramientas y operaciones fundamentales y corrección de los defectos de ajuste y montaje*, por J. MERLOT. 2.ª ed. Un volumen de 572 páginas, de 23×15 cm., con 876 grabados y 15 tablas.

Modelos de edificios para urbanizaciones y colonias, por J. HUGUET CARBONELL. Un volumen de 288 págs. de 27,5×19 cm., con 188 láminas representando diversos modelos de edificios, con sus detalles técnicos y cálculos de construcción.

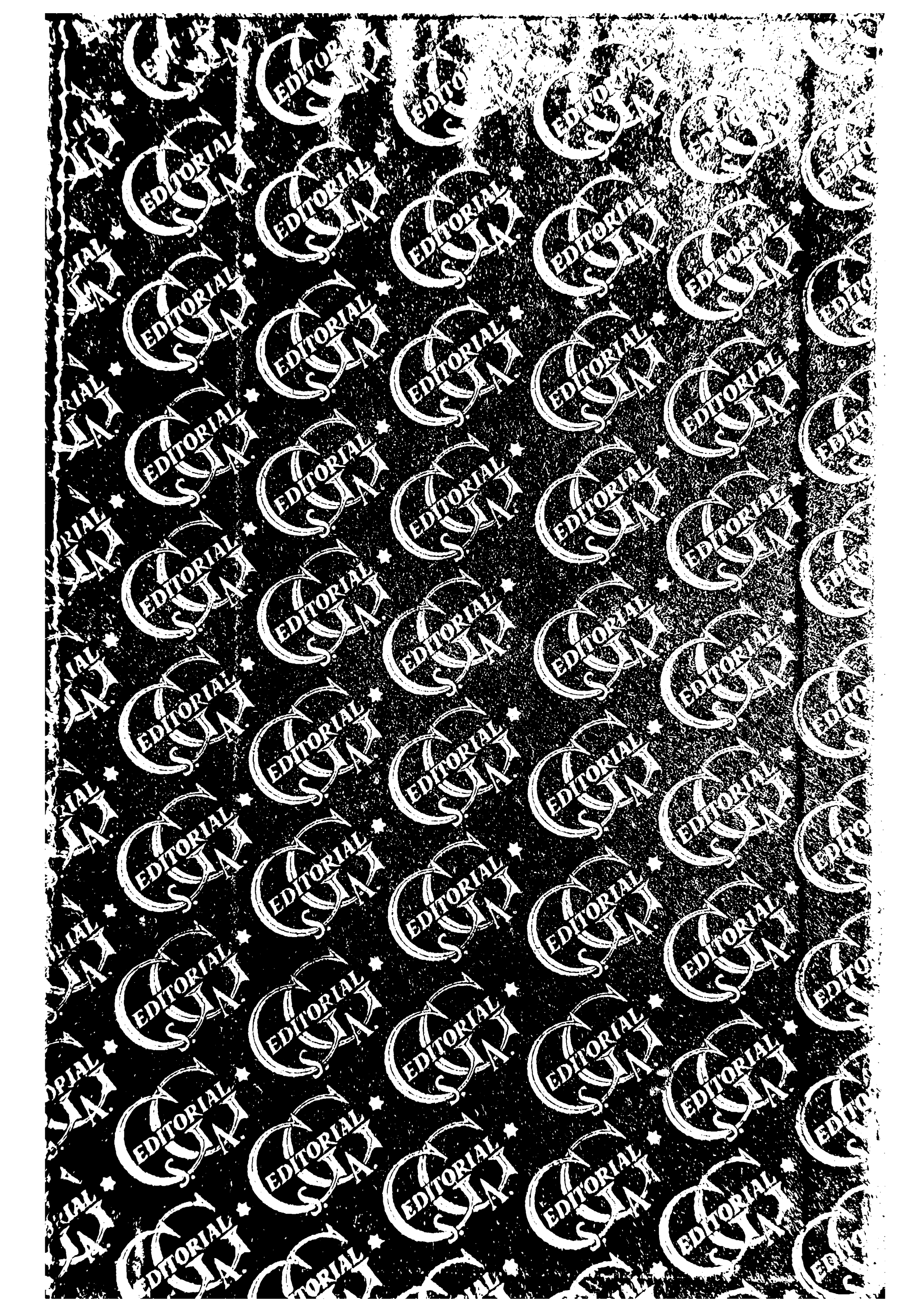
Ciencia recreativa. *Enigmas y problemas, observaciones y experimentos, trabajos de habilidad y paciencia*, por el Dr. J. ESTALELLA. 3.ª ed. Un volumen de 518 págs., de 23×15 cm., con 882 grabados.

El relojero práctico, por F. J. GARRARD, relojero del Almirantazgo inglés. Un volumen de 550 págs., de 12×19 cm., con 329 grabados.

Método de dibujo industrial de máquinas, por J. BARAT MARTÍNEZ, perito industrial. Álbum de 26×31,5 cm., con 32 láminas y 8 páginas explicativas.

Elementos de Meteorología, por E. FONTSERÉ. Un volumen de 358 páginas, de 25×16 cm., con 150 grabados y 27 láminas fuera del texto.

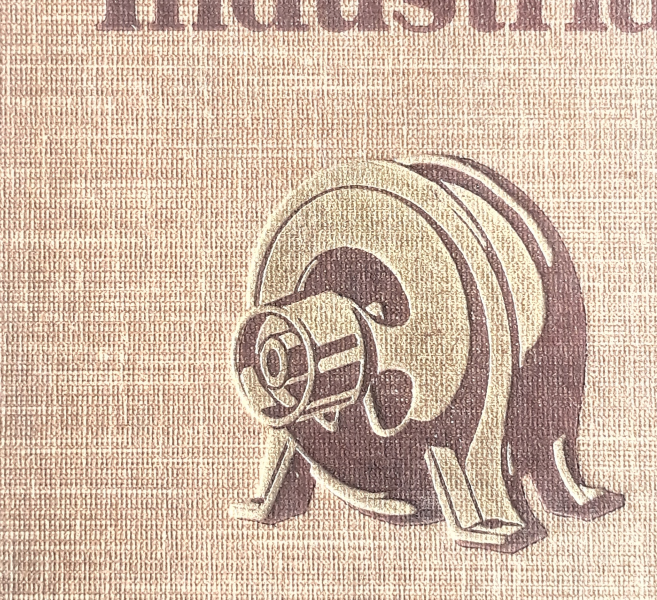
El Catálogo de la Editorial Gustavo Gili, S. A., se remite gratis a quien lo solicite


EDITORIAL
S.A.


EDITORIAL
S. A.

P. Roberjot

Electricidad Industrial



V. Centrales y Redes





ELEMENTOS DE ELECTRICIDAD INDUSTRIAL

TOMO V

CENTRALES Y REDES

POR

P. ROBERJOT

PROFESOR DE LA ESCUELA INDUSTRIAL DE REIMS

Y

C. FÉRU

INGENIERO DE LA COMPAGNIE ELECTRO-MÉCANIQUE

VERSIÓN POR

JOSÉ M.ª MANTERO

LICENCIADO EN CIENCIAS





BARCELONA

GUSTAVO GILI, EDITOR

Calle de Enrique Granados, 45

MCMXXIV

Guinart y Pujolar, impresores; Bruch, 63. — Barcelona

CAPÍTULO PRIMERO

Centrales de corriente continua

I. **Consideraciones generales acerca de la instalación y montaje de la maquinaria eléctrica.**—Vamos a desarrollar en este tomo lo concerniente al montaje de la parte eléctrica de las centrales y estaciones transformadoras, es decir, a tratar del montaje de máquinas, aparatos, redes, etc. Claro está que partimos del supuesto de que el montador electricista al llegar a la central encontrará ya instalada, o instalándose, toda la parte mecánica, así como los zócalos para las máquinas, y los canales o alcantarillas para los cables, ya preparados y a punto de ser utilizados.

Cuando se trata de montar una estación de gran potencia y que comprenda varias máquinas, se disponen generalmente los bastidores de modo que se puedan correr fácilmente las máquinas con grúas de puente y empalmes de vía férrea, para lo cual bastará asegurar el buen funcionamiento de los aparatos de elevación.

Pero si la importancia de la central no es bastante

para justificar la instalación fija de aparatos costosos, hay que adoptar procedimientos de maniobra prudentes y todo lo rápidos que sea posible para el transporte y colocación de las piezas pesadas.

Para mover y trasladar piezas en un piso horizontal o con muy poca pendiente se utilizan palancas, gatos y rodillos teniendo cuidado de preparar un camino por rodadura mediante maderos o vigas gruesas de hierro, procurando que no pasen por bóvedas endebles o por alcantarillas o fosos cubiertos. Si no es posible evitar estos pasos, se procura un sostén o soporte conveniente.

Si hay que bajar una pieza pesada, pasando de un nivel alto a uno mucho más bajo, se debe evitar el empleo del plano inclinado en más de 20 a 25 grados sobre la horizontal, a causa de los peligros que puede traer consigo el que la pieza resbale o se vuelque. En estos casos se procede del modo siguiente: se disponen sobre el plano del nivel inferior maderos de igual espesor (como traviesas de vía férrea, por ejemplo), y encima otra capa de maderos dispuestos perpendicularmente a la dirección de los primeros, otra capa de traviesas paralelas a las de la capa inferior, y así sucesivamente hasta llegar al nivel superior (fig. 1). Entonces se lleva la pieza sobre la plataforma así formada, y después se van quitando uno a uno por medio de un cric, todos los maderos que forman esta plataforma, elevando ligeramente y unos tras otros los diferentes lados de la pieza.

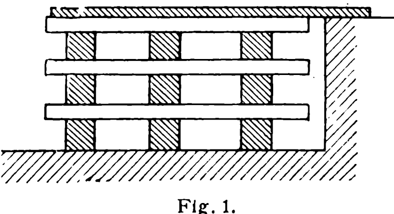


Fig. 1.

Para conservar la estabilidad de esta plataforma,

no debe dársele una altura mayor de las tres cuartas partes de la longitud de las traviesas que han servido para formarla.

Si se cree más conveniente el empleo del plano inclinado, hay que procurar que nunca resbale hierro sobre hierro, y que el centro de gravedad de la pieza esté siempre lo más cerca posible del plano de resbalamiento.

Una vez colocadas las máquinas en sus zócalos, deben acoplarse a los árboles motores, siguiendo para el acoplamiento y la nivelación, las instrucciones dadas en el tomo IV «Instalaciones interiores». Si los pares han de ser grandes, y por consiguiente las reacciones sobre el estator han de resultar considerables, se deben substituir las cuñas de ajuste por piezas de un solo

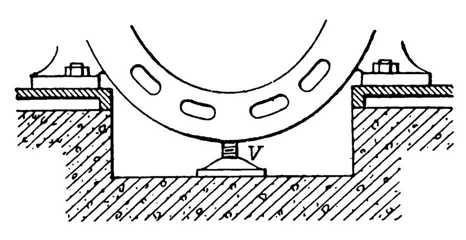


Fig. 2.

espesor. Sin embargo, si hay necesidad de emplear varios espesores, cada cuña debe cubrir la superficie completa de apoyo.

Para una máquina de diámetro muy grande y cuyo estator esté sostenido por dos zócalos separados, se dispone en la parte inferior un gato de soporte *V* (fig. 2) para impedir la flexión que podría producir el peso de la armazón.

Para las máquinas cuyo par es muy elevado, la armazón, después de haber regulado el entrehierro,

debe fijarse muy bien al zócalo. Puede formarse una idea del valor de este par, aplicando la fórmula:

$$C = \frac{716,4\ \mathrm{HP}}{N} \text{ kilográmetros [1]}$$

siendo HP la potencia, en caballos de vapor, de la máquina, y N la velocidad en vueltas por minuto.

Después de regular la altura del nivel del zócalo, es conveniente mantener el eje del estator un poco más bajo que el eje del rotor; siempre será más fácil colocar un espesor entre la armazón y el zócalo, que rebajar el zócalo en caso que haya necesidad de rectificar el entrehierro.

El establecimiento de la línea de árboles de un grupo de gran velocidad, es operación muy delicada y debe ser objeto de especial interés. En todos los casos de vibraciones de un grupo turbo-alternador, antes de toda comprobación de equilibrado (ver tomo IV) hay que asegurarse de la disposición exacta de los ejes de los dos rotores. Los procedimientos corrientes son a veces impracticables, lo cual justifica la aplicación del siguiente dispositivo: sobre cada uno de los extremos del árbol de los dos rotores que hay que acoplar, y cerca del manguito, se fija una varilla metálica fina

[1] En efecto, se sabe (tomo I, «Generalidades», pág. 298), que el trabajo producido en un segundo por una máquina cuyo par es C kilográmetros y la velocidad N vueltas por segundo es: $C \times 2\pi n$ kilográmetros, o sea $C \times 2\pi \frac{N}{60}$, es decir, $C \times \frac{\pi N}{30}$. Ahora bien, siendo la potencia HP caballos, el trabajo por segundo es HP × 736 joules, o bien HP × $\frac{736}{9,81}$ kilográmetros. Por consiguiente:

$$C \times \frac{\pi N}{30} = \mathrm{HP} \times \frac{736}{9,81} \quad \text{y} \quad C = \frac{\mathrm{HP}}{N} \times \frac{736 \times 30}{3,14 \times 9,81} = \frac{\mathrm{HP}}{N} \times 716,4.$$

análoga a la punta de un gramil (fig. 3). Las puntas de estas dos varillas se ponen de frente, y se hacen girar muy lentamente los rotores. Durante esta rotación, las dos puntas deben estar en contacto, describiendo

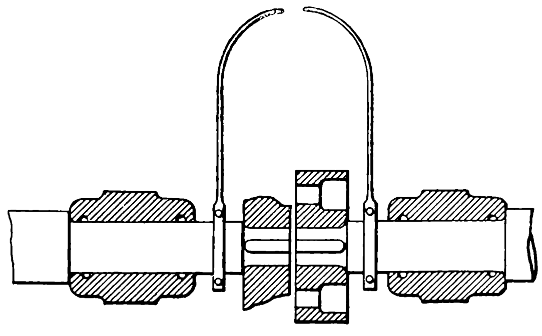


Fig. 3.

de este modo una circunferencia cuyo plano es perpendicular al eje de rotación, y cuyo centro está sobre este eje.

Este procedimiento se aplica con utilidad al acoplamiento de los turbo-grupos. Para esta clase de máquinas hay que tener en cuenta también la desnivelación que puede producirse en caliente por la dilatación. Si la línea de árboles se ha establecido en frío, debe estarlo según una línea quebrada en el plano vertical, y presentar una altura de eje menor hacia el lado de la turbina. Para ciertas turbinas (Rateau) esta diferencia puede llegar a ser hasta de dos milímetros.

II. **Máquinas generadoras.**—La dinamo, cuya instalación mecánica está terminada se pone en orden, en lo que respecta a las conexiones.

Si la armazón es de dos piezas, se unen los hilos inductores de ambas partes. Se monta la corona que lleva las espigas portaescobillas, se hacen las conexio-

nes que deben unir las escobillas dos a dos, y las escobillas se disponen del modo conveniente según el sentido de rotación de la máquina. Las tomas de corriente de los portaescobillas se unen a los bornes de la máquina por medio de conductores flexibles cuya longitud ha de ser suficiente para permitir el desvío de la escobilla.

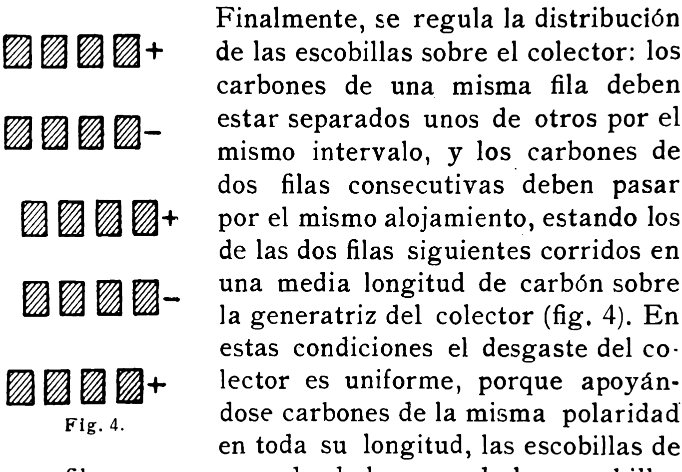


Fig. 4.

Finalmente, se regula la distribución de las escobillas sobre el colector: los carbones de una misma fila deben estar separados unos de otros por el mismo intervalo, y los carbones de dos filas consecutivas deben pasar por el mismo alojamiento, estando los de las dos filas siguientes corridos en una media longitud de carbón sobre la generatriz del colector (fig. 4). En estas condiciones el desgaste del colector es uniforme, porque apoyándose carbones de la misma polaridad en toda su longitud, las escobillas de una fila no pasan por donde han pasado las escobillas de la fila anterior de igual polaridad.

III. **Redes.**—La máquina generadora va unida al cuadro por una línea principal que conduce la corriente total, y por la conexión de los inductores. Como ordinariamente uno de los bornes de los inductores va unido directamente al borne de polaridad conveniente del inducido, sobre la máquina misma, un solo hilo va del segundo borne de los inductores al cuadro. La sección de este conductor debe ser tal que pueda ser recorrido por una corriente de cerca del cinco por ciento de la corriente total que la máquina ha de producir. El aislamiento debe establecerse para una tensión superior a la de la máquina, porque en caso de

romperse el circuito de excitación, como uno de los extremos de este circuito está unido a un polo del inducido, se suma (a la tensión que hay entre el inducido y la masa) la sobretensión de ruptura.

En el caso de que haya que unir los dos bornes del inductor al cuadro, no se debe nunca emplear un solo cable de dos conductores, sino que es preciso separar ambos conductores de modo que queden a una distancia conveniente.

Los conductores principales están formados por cables desnudos o aislados, o por barras de cobre. El cable aislado se emplea de preferencia en líneas suspendidas sobre el suelo y para pequeñas secciones. Para secciones mayores, de hasta 400 a 500 mm^2, se emplean cables desnudos, resultando ventajoso dividir la sección total en varios conductores separados, pues para una sección siquiera de 300 mm^2 la densidad de corriente no debe pasar de 1,5 amperes por milímetro cuadrado, con lo cual se tiene un gasto excesivo de cobre. Cuando la sección pasa de 400 a 500 mm^2, se emplea el cobre en barras las cuales tienen en general de 5 a 10 mm. de espesor y distintas anchuras. Se

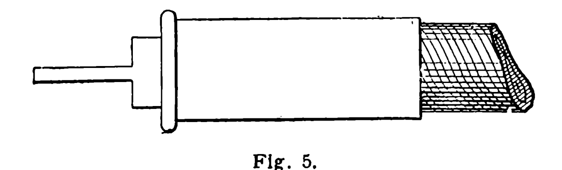


Fig. 5.

determina el número de barras que dan la sección pedida, de modo que la instalación resulte lo más económica que sea posible en este particular.

Para los cables aislados semiflexibles, los radios de curvatura no deben ser menores de 20 a 30 veces su diámetro. Los extremos para fijarlos en bornes se

sueldan de antemano a las presas de contacto, que pueden estar protegidas por un tubo de ebonita (fig. 5). La colocación de los conductores desnudos se hace casi siempre en canales o alcantarillas; la instalación debe ser especialmente atendida y bien hecha en el trayecto máquina-cuadro, porque cualquier cortocir-

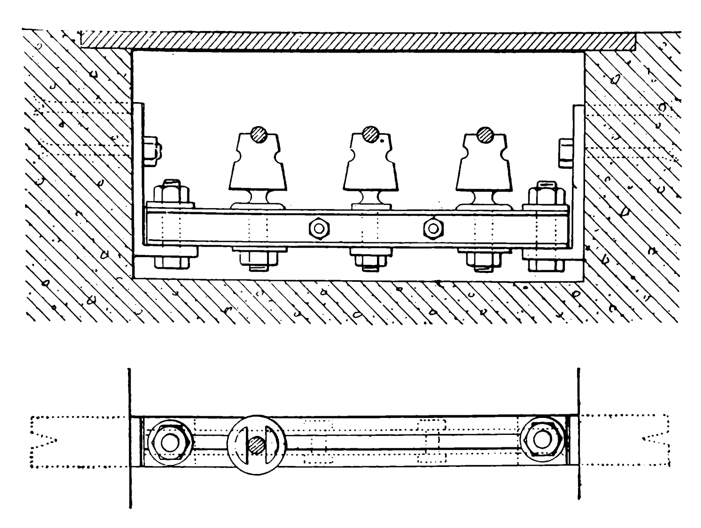


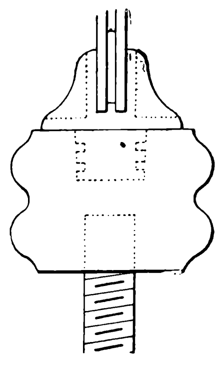
Fig. 6.

cuito que se produjera en este recorrido, por no estar defendido por los aparatos de protección, causaría un accidente grave en la máquina.

El cable, dentro de la alcantarilla, va sostenido por aisladores que distan entre sí de 80 cm. a 1 metro; estos aisladores van fijados sobre barras de hierro empotradas en las paredes de la alcantarilla (fig. 6).

Las barras de cobre se instalan mediante pinzas solidarizadas con los aisladores (fig. 7). Los contactos entre las diferentes barras se hacen por superposición, estañando las superficies de contacto, la cual debe ser

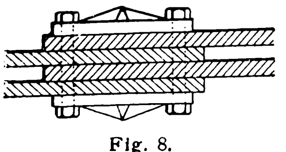
unas diez veces mayor que la superficie de la sección de la barra. Para establecer dichos contactos, se aprietan las barras entre sí, mediante chapas con pernos (fig. 8), dejando entre las barras de un mismo conductor intervalos iguales a sus espesores.


Fig. 7.

Para intensidades muy elevadas, hay que separar de los conductores las piezas de metal magnético, y asegurar la rigidez de las piezas de soporte, ya que las acciones electromagnéticas ejercidas sobre los conductores pueden ser considerables.

Cuando se prepara una red de gran sección, es de la mayor importancia buscar el menor camino posible, no sólo con miras a las caídas de tensión, sino por la cantidad de cobre que hay que emplear. También es de gran importancia no cortar los conductores con las dimensiones que han de tener sino después de haber determinado con gran cuidado todas las medidas.

Cuando una red de cobre desnudo está cerca de un paso, hay que protegerla con planchas para evitar todo contacto posible. Cuando se teme que haya humedad se emplean a veces los cables dentro de tubos de plomo; los cables así protegidos no deben suspenderse, sino apoyarse en toda su longitud sobre el suelo, o sobre ménsulas de madera. Una vez colocados estos cables no debe ejercerse ninguna tracción sobre su cubierta; los extremos que hay que empalmar se introducen en la brea contenida en cajas de fundición.


Fig. 8.

IV. **Cuadro de distribución.**—El cuadro de distribución de una central se compone de varios paneles separados:

1.° un panel para la maniobra y regulación de la máquina generadora;

2.° un panel completo independiente del anterior para los servicios auxiliares (motores de alimentación, economizadores, condensador... en el caso de un grupo termoeléctrico);

3.° un panel para los arranques de las líneas.

Montaje del cuadro.—Los paneles están constituídos generalmente por una plancha de mármol poco higrométrico, que lleva los aparatos de maniobra, fijada sobre un bastidor metálico de hierro laminado.

El montaje de este bastidor constituye la primera fase de la instalación. Los hierros en U que lo forman se unen mediante pernos de cerrajero, y el sistema así formado, que es el bastidor, se nivela y fija sólidamente de modo que pueda soportar el peso del mármol y de los aparatos. Entre las planchas de mármol y los hierros sobre que se apoyan, se dispone generalmente una tira de amianto.

Es muy frecuente encontrar los mármoles ya perforados convenientemente por la casa que los expende, por lo cual no hay más que instalar sobre los mismos los aparatos en los puntos ya determinados de antemano. Pero si hubiera necesidad de abrir nuevos agujeros, hay que hacerlo con sumo cuidado; para este objeto se emplean brocas planas ordinarias de sección rectangular y se abre el agujero a muy poca velocidad y en seco, mojando la broca con esencia de trementina. Es cómodo y conveniente empezar abriendo un agujero de poco diámetro para irlo ensanchando después.

Para pulimentar el mármol se emplea la granalla de plomo y el polvo de mármol, frotando con éstos la

plancha que se trata de pulir, bajo un chorro de agua.
Los reostatos se colocan ordinariamente por detrás

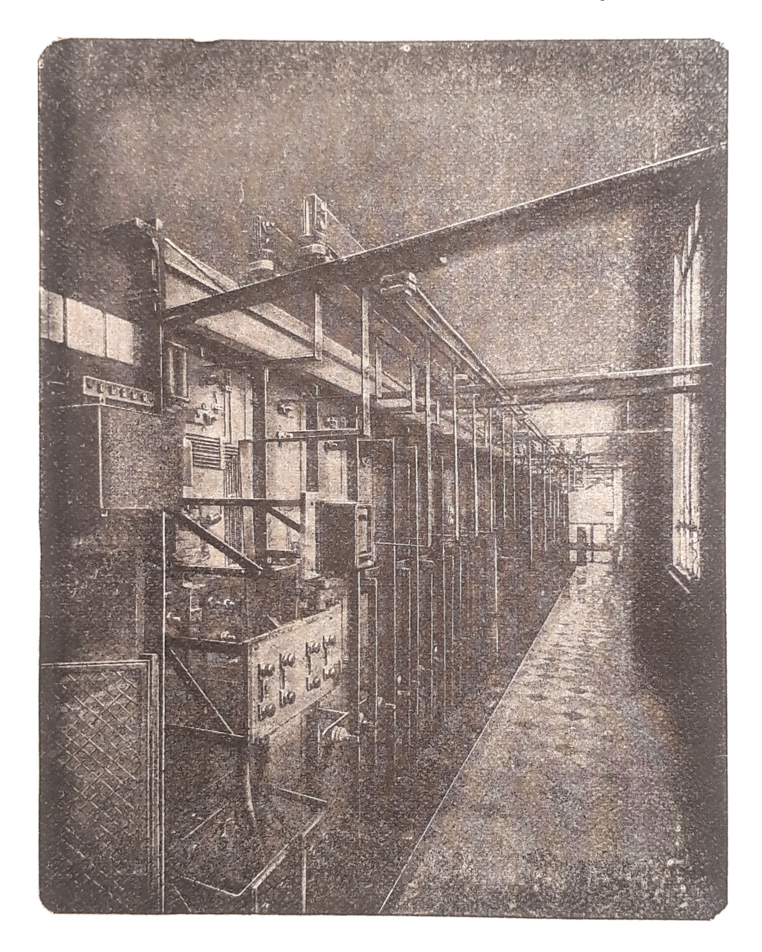


Fig. 9.

de los paneles; van suspendidos de los chasis o bastidores, y maniobrados mecánicamente desde la parte delantera del cuadro. Los reostatos no deben estar

debajo de ningún aparato inflamable o que perjudique el calor, y deben estar bien aireados (fig. 9). Los disyuntores automáticos y todos los aparatos en que se puede producir un arco no deben llevar nunca por encima piezas metálicas, pues habría peligro de que éstas fueran alcanzadas por el arco, con lo cual se tendría una comunicación accidental con la masa (o como se dice ordinariamente, una *puesta a masa).*

Al colocar el cuadro se debe dejar sitio suficiente para poder andar por detrás del mismo.

Distribución.—El panel de maniobra y de regulación del generador tiene, *por lo menos,* los siguientes aparatos (fig. 10): un *disyuntor* automático *D*, *D* unido por una parte a un polo de la máquina, y por otra parte a una barra principal; un *interruptor* *I*, *I* de mano, que sirve para cortar el segundo conductor que viene de la dinamo; un *voltímetro* *V* entre los cables de llegada que proceden de los bornes de la dinamo; un *amperímetro* *A*, *A* entre el disyuntor y la barra correspondiente, y un *reostato* *R* para regular la corriente de excitación.

Para poner en servicio la máquina, se lleva la tensión a un valor conveniente por medio del reostato, se cierra el interruptor automático, y en seguida el interruptor de mano. Es importante cerrar en segundo lugar el interruptor de mano, porque así queda libre el disyuntor, que puede funcionar inmediatamente en caso de cortocircuito; si se hiciera lo contrario, habría peligro de accidente al retener el disyuntor con la mano.

Para la maniobra de los servicios auxiliares, y en particular para los grupos moto-bombas de condensación, si se trata de una central térmica, hay un panel especial de arranque, estando protegida cada línea por un juego de fusibles *F*, *F*. La derivación de estos

arranques se hace en los bornes de la máquina de modo que aunque se soltara el disyuntor principal, no se pararían los motores de la estación.

Cada uno de los paneles de arranque comprende un disyuntor automático (fig. 11) y un interruptor de mano, cada uno sobre un polo, un amperímetro y a

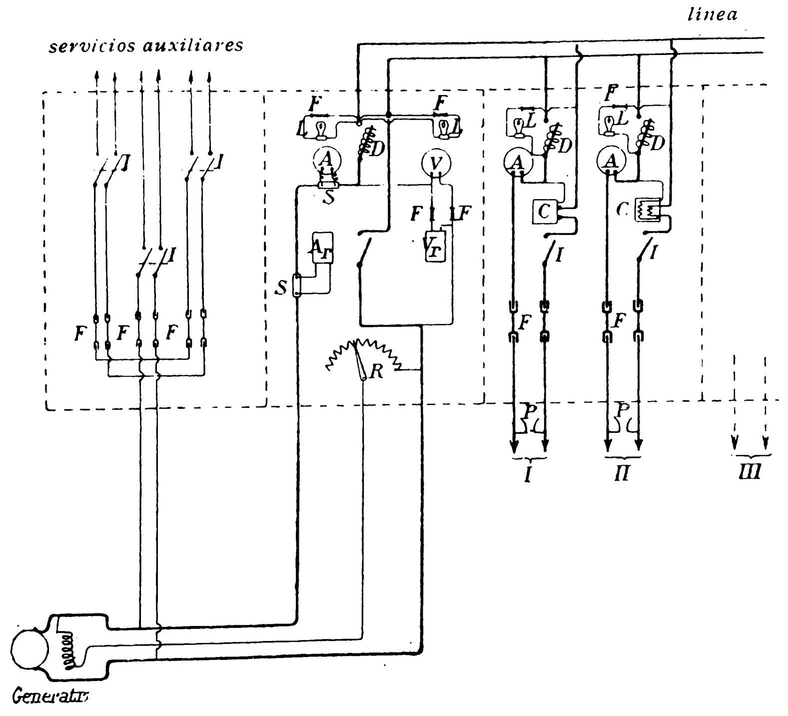


Fig. 10.

veces un contador *C* (fig. 10); entre las líneas de arranque, y después de los interruptores, hay derivados un voltímetro *V* y una lámpara *L*, *L*, así como un dispositivo de protección *PP* contra las sobretensiones (pararrayos).

Por último, para la revisión y comprobación de la distribución, se dispone un voltímetro registrador V_r si

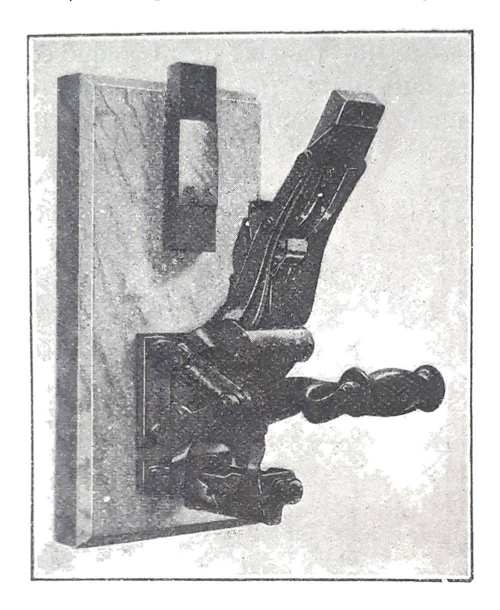


Fig. 11.

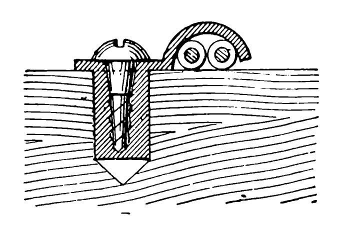
la central es de luz, y un amperímetro registrador A_r si se trata de centrales de fuerza (tracción).

Conexiones.—Las conexiones principales entre aparatos se hacen de cobre plano cuya anchura es generalmente de diez a quince veces su espesor, pues de este modo se asegura mejor el buen contacto. Se da a las conexiones la forma que responda mejor a la necesidad de tener la mayor rigidez posible, y se deja una distancia de seguridad suficiente entre uno y otro conductor (fig. 9).

Casi siempre es posible disponer las barras de tal modo que no haya peligro de contactos accidentales, y se deja el cobre al descubierto. De no ser así, hay

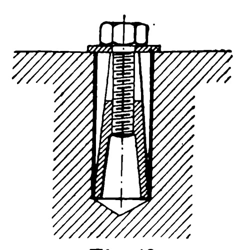
que aislar perfectamente las partes de los conductores donde se tema algún contacto perjudicial.

Cuando una barra de cierta longitud sirve para transmitir una gran intensidad, es preciso que vaya apoyándose a distancias suficientes sobre puntos fijos, y debe pasar a distancia bastante grande de los aparatos de medida, cuyas indicaciones pudieran ser alteradas por la corriente.


Fig. 12.

Los aparatos han de colocarse sobre el cuadro de tal modo que los conductores no hayan de formar lazos ni recorrer caminos demasiado largos, sin utilidad alguna.

Los contactos entre barras y aparatos han de estañarse, y su superficie debe ser de unas diez a quince veces mayor que la superficie de sección de los conductores. Si no hay posibilidad de estañar los contactos, da buenos resultados la interposición de una hoja de papel de estaño.


Fig. 13.

Los conductores de voltímetros, lámparas, etc., están constituídos por hilos aislados, tendidos *separadamente;* se colocan a lo largo del mármol sujetos por bridas pequeñas. La fijación de estas bridas se hace mediante tornillos roscados en taruguitos de madera que van introducidos en los agujeros del mármol (fig. 12). También se emplea para esta fijación una especie de tuerca troncocónica, que separa, al apretarse, las aletas de una anilla hendida (fig. 13). Cada uno de los circuitos de hilo fino debe llevar un fusible

(1 a 5 amperes) y los contactos entre hilos finos y barras principales deben hacerse con pernos colocados con este objeto; un hilo fino colocado en un borne de contacto principal no puede hacer más que disminuir el valor del contacto de las superficies puestas en presencia (fig. 9).

Cuando un polo de la maquina, el polo — , por ejemplo, está puesto a tierra, y hay que agregar una resistencia adicional a un relevador (relais) o a un voltímetro, hay que colocar esta resistencia entre el polo + y el aparato, porque la tensión entre este aparato y la masa es igual a la tensión entre los polos, menos la caída de tensión *Ri* en la resistencia (fig. 14), con lo cual el aislamiento del aparato queda sometido a una tensión menos elevada que si la resistencia se hubiera unido al polo negativo (polo —).

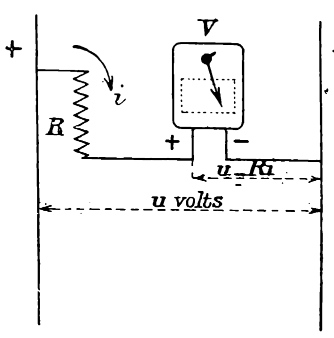


Fig. 14.

Puede darse el caso de que sea preciso colocar en tubos las conexiones de los circuitos voltimétricos, y entónces hay que procurar no poner en un mismo tubo dos hilos a potenciales diferentes.

Estas disposiciones se aplican a todos los cuadros que sólo se diferencian del anterior en los aparatos, en su número y colocación. Algunos cuadros, en particular los instalados a bordo de los buques, no tienen paneles aisladores: todos los aparatos, fijado cada uno sobre aisladores, van fijados sobre los hierros; las barras van montadas sobre aisladores, y las conexiones de hilo fino van encerradas en tubos.

V. **Máquina que funciona en paralelo con una batería de acumuladores.**—Las baterías de acumuladores se emplean especialmente en los casos siguientes:

1.° Cuando la máquina generadora suministra, durante una parte del tiempo (generalmente durante el día), la energía a los aparatos de utilización, y el alumbrado ha de estar asegurado fuera de estas horas de funcionamiento;

2.° Cuando la máquina generadora produce una energía media, y el circuito de utilización requiere *a saltos* sobrecargas más o menos grandes; entonces la batería se llama *tampón* o *de compensación.* Este es el caso característico en las instalaciones de tracción.

Primer caso. — Máquina generadora de utilización intermitente

La dinamo suministra la corriente de carga de la batería al mismo tiempo que alimenta al circuito de utilización. Ahora bien, supongamos, por ejemplo, que la batería tenga sesenta elementos en serie, funcionando el circuito de utilización bajo la tensión de 120 volts en los bornes de arranque. Para cargar la batería, la dinamo deberá dar una tensión de 2,5 volts por elemento, o sea $60 \times 2,5 = 150$ volts; la red sufriría en este caso una sobretensión de $150 - 120 = 30$ volts, o sea un 15 °/₀ más que la normal, lo cual resulta inadmisible.

Por otra parte, a medida que la batería se descarga, la fuerza electromotriz de sus elementos disminuye; por consiguiente, para mantener la tensión constante hay que poder aumentar el número de elementos en serie a medida que la batería se va descargando.

Para poder cargar la batería con la dinamo mientras está alimentando la red y mantener el voltaje

constante, durante la utilización de la batería, se recurre a *un reductor de carga y descarga,* con el cual se puede variar el número de elementos en serie en la batería.

Este aparato está formado por una pinza de contacto que se corre sobre una serie de topes análogos a los

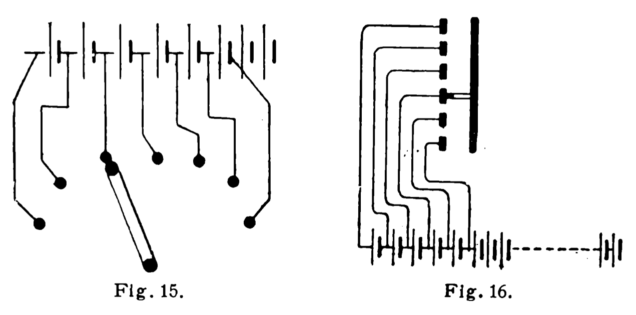


Fig. 15. Fig. 16.

de un reostato (fig. 15), o paralelamente a una barra (fig. 16), o alrededor de un punto central. El número de topes permite poner fuera de circuito el 15 % de los elementos. Para una tensión elevada, 440 volts, por ejemplo, hay que regular el voltaje sobre un gran

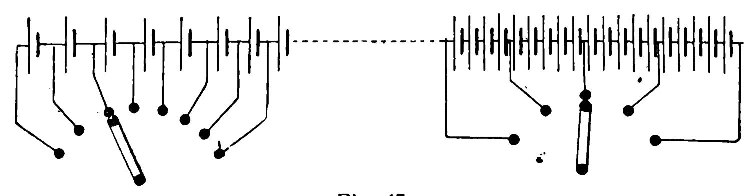


Fig. 17.

número de elementos, y el regulador resulta entonces costoso y de difícil manejo; en este caso se divide el regulador en dos partes, la primera, que sirve para regular un extremo de la batería, a razón de un elemento por tope, y la segunda, en el otro extremo de la batería, regulando de seis a ocho elementos por tope (fig. 17).

Si la anchura del contacto de la manivela es menor que el intervalo que hay entre dos topes sucesivos, la corriente se corta cada vez que se pasa de un tope al siguiente; si esta an-

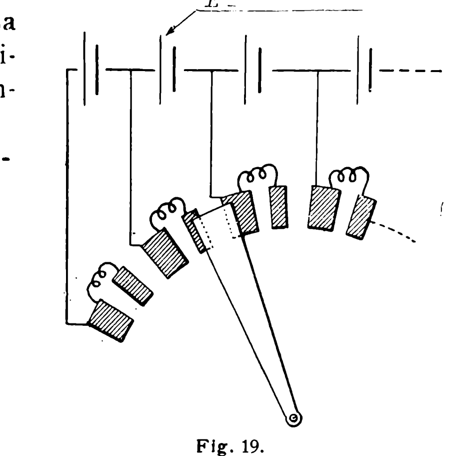


Fig. 18.

Fig. 19.

chura es mayor que dicho intervalo entre dos topes,

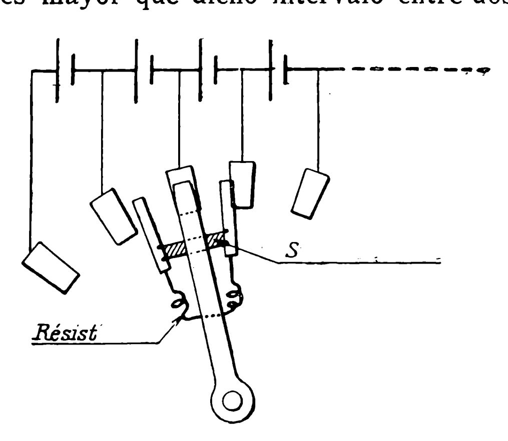


Fig. 20 (*s*, soporte aislante).

se pone un elemento en cortocircuito al pasar de un tope al otro (fig. 18). Para evitar estos dos inconve-

nientes, se divide cada tope en dos partes, habiendo entre cada dos partes una resistencia conveniente de modo que cuando se pasa de un elemento al otro, la corriente no queda cortada, y el elemento conmutado *E* no queda tampoco en cortocircuito, sino cerrado sobre la resistencia que une las dos partes del tope correspondiente en el reductor (fig. 19). También se puede emplear el dispositivo representado en la figura 20.

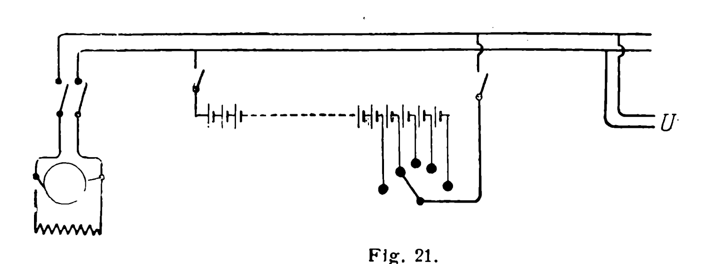


Fig. 21.

El montaje completo se hace según el esquema de la figura 21, siendo *U* la línea receptora.

Aparatos.—El cuadro tiene un panel especial para la batería, que lleva los siguientes aparatos (fig. 22): un *disyuntor D* de máxima y un interruptor de mano *I* para la ruptura bipolar, un *amperímetro polarizado A* de dos direcciones cuya aguja se mueve en un sentido o en otro según el sentido de la corriente, y cuyo cero está en la mitad de la graduación, un *indicador de sentido de corriente,* un *reductor* de carga y descarga R_d unido a una barra de distribución (tomando la polaridad conveniente) por medio de un tope móvil, y estando los topes de paso unidos a los elementos de reducción mediante conexiones de sección suficiente para el paso de la corriente total de la batería. En *F* se ven los fusibles y en R_h el reostato de campo.

El voltímetro *V* de la máquina tiene un conmuta-

dor que sirve para medir sucesivamente el voltaje entre las barras y entre los polos de la dinamo: en el momento de poner en paralelo la dinamo sobre las barras, hay que comprobar la igualdad entre estos dos voltajes.

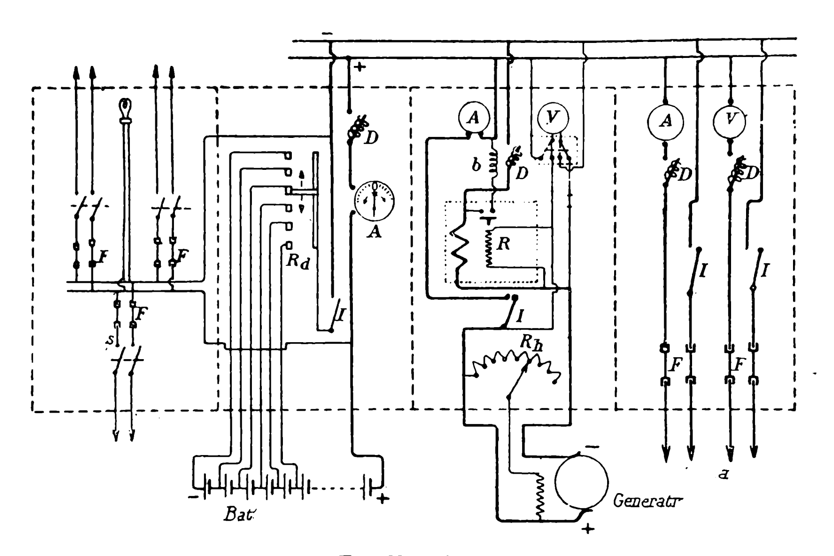


Fig. 22 (*a*, líneas).

Para evitar la descarga de los acumuladores en la dinamo, en caso de bajar la tensión en los bornes de esta última, se dispone sobre un conductor que una un polo de la máquina con las barras, un relevador de retroceso *R* que ponga en acción al disyuntor, como se ve en la figura 22.

Relevador.—El relevador puede producir la apertura del disyuntor de un modo instantáneo o al cabo de un cierto tiempo, y está combinado para actuar igualmente bajo la acción de la corriente máxima producida por la máquina.

El relevador de apertura instantánea consiste frecuentemente en un aparato llamado *de contacto,* cuya parte móvil establece el contacto cerrando el circuito del carrete, que deja en libertad al disyuntor, ya sea cuando la corriente es máxima, o cuando ésta se invierte (amperímetro polarizado, contador *O'K*, tomo II, página 184, wattímetro).

El relevador de tiempo o de apertura diferida se compone, de preferencia, de un sistema electromagnético, estando retardado el movimiento de las piezas, ya sea por la adherencia de dos superficies regulables que se separan en el seno de un líquido viscoso, o por el movimiento de un disco en un tubo lleno de aceite.

Uno de los muchos sistemas de relevador para corriente continua está formado del modo siguiente: un núcleo de hierro que lleva dos devanados, (uno *A* de hilo fino, y otro *B* de hilo grueso) está dispuesto en circuito magnético cerrado, y en su parte media hay dos salientes formando como los extremos del circuito magnético, pero separados por un entrehierro importante *E*. Las varillas móviles están dispuestas de modo que una, la *C* da el contacto de máxima frente al devanado *B*, y la otra *D* dirigida hacia el núcleo cortado *E*, da el contacto de inversión. El devanado *A* es recorrido por una corriente dada por la tensión entre los bornes de la máquina y sensiblemente constante, y el devanado *B*

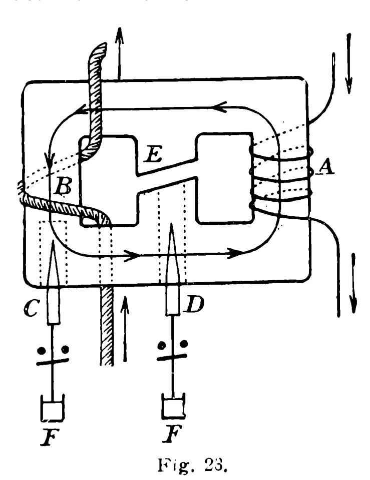


Fig. 23.

es atravesado por la corriente que da la máquina (figura 23).

Los sentidos de los devanados son tales que cuando la máquina da corriente de sentido normal, los flujos producidos por los dos devanados son del mismo sentido y se suman, no produciéndose ninguna derivación de flujo a través del entrehierro *E*. La acción combinada de los dos devanados hace subir la varilla *C* para un máximo de corriente en *B*. Cuando la corriente en *B* se invierte, los dos flujos emitidos por *A* y *B* atraviesan el entrehierro, y la varilla *D* se eleva (figura 24).

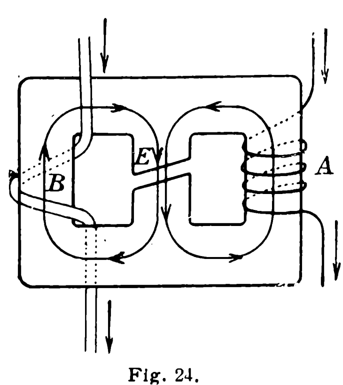


Fig. 24.

Sobre las dos varillas puede fijarse un dispositivo de retardo conveniente. En el esquema de la figura 22 se ve en *R* un relevador de esta clase. Cuando la corriente tiende a invertirse en la dinamo (lo cual sucedería si su fuerza electromotriz llegara a ser inferior a la de la batería), se establece el contacto que cierra el devanado *b* sobre las barras, y entonces este devanado es recorrido por una corriente cuyo efecto electromagnético es hacer funcionar al disyuntor *D*.

Segundo caso.—Dinamo con «tampón»

El regulador de carga y de descarga no tiene aplicación en este caso, porque la batería debe obrar instantáneamente al variar la corriente de un modo brusco. Lo que se hace en este caso es emplear un *ele-*

vador-reductor de tensión, que es una generatriz dispuesta en el circuito de los acumuladores y montada en oposición con la batería (fig. 25). Sea E la f. e. m. de la dinamo generatriz G; E_1 la f. e. m. de la batería, y E_2 la del elevador-reductor S. Sean: I la corriente

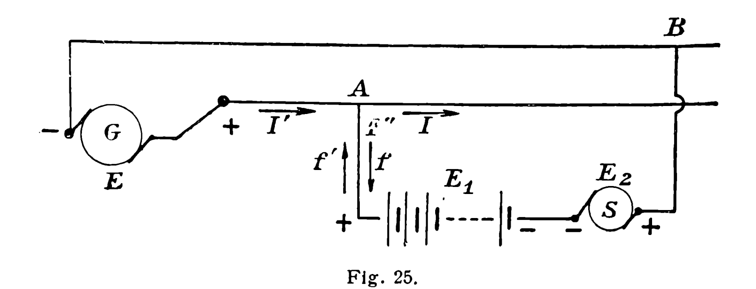


Fig. 25.

producida en el circuito exterior; I' la corriente dada por la generatriz, I'' la corriente en la batería, R_1 la resistencia de la generatriz, y R_2 la resistencia de la batería y del elevador de potencial. Supongamos que la corriente en la batería tenga el sentido f; aplicando la ley de Kirchhoff al punto A, se tiene:

$$I' = I + I'',$$

y haciendo aplicación de la misma ley al contorno $GASBG$, resulta;

$$E - E_1 + E_2 = R_1 I' + R_2 I'',$$

o sea:

$$E - E_1 + E_2 = R_1(I + I'') + R_2 I'';$$

de donde:

$$(R_1 + R_2) I'' = E - E_1 + E_2 - R_1 I,$$

o finalmente:

$$(R_1 + R_2) I'' = E_2 - (E_1 - E + R_1 I).$$

Luego si $E_2 = E_1 + R_1 I - E$, resulta $I'' = 0$, y la batería es indiferente, no recibiendo ni produciendo corriente alguna. Esta condición se cumple para una corriente mediana. Si E_2 disminuye, I'' es negativa, teniéndose por lo tanto el sentido f', y la batería comunica corriente a la red, que es lo que debe suceder si la corriente requerida por la utilización aumenta. Al contrario, si E_2 aumenta, I'' es positiva, teniéndose el sentido f, y la batería recibe la corriente de carga, lo cual deberá tener lugar si disminuye la corriente necesitada por la red. Cuando la corriente en la red resulta excesiva, los polos del elevador de tensión se invierten, y queda en serie con la batería.

Para realizar estas condiciones, veamos lo que es preciso: el elevador-reductor movido por un motor

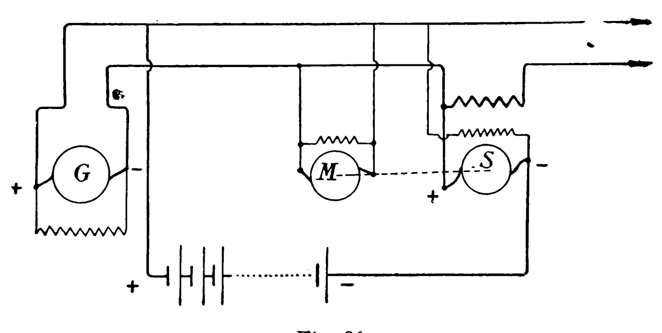


Fig. 26.

shunt M, es una generatriz compound S (fig. 26) cuyo inducido es recorrido por la corriente de la batería, cuya excitación shunt está derivada en los bornes de la batería, y cuya excitación serie, que produce un flujo dirigido en sentido inverso del que da la excitación shunt, es recorrida por la corriente de línea. Como ya hemos dicho, las acciones respectivas de los dos devanados se regulan de tal modo que, para una

corriente mediana en la línea, la batería sea indiferente; si esta corriente aumenta, el devanado serie hace disminuir la tensión del elevador de tensión, y la batería da corriente a la red; al contrario, si la corriente de línea baja más del valor medio de la misma, el campo antagonista disminuye, la fuerza electromotriz del elevador de tensión aumenta y la batería se carga.

Para regular el elevador de tensión de modo que la batería no produzca efecto alguno para un valor medio de la corriente, se pone sobre el circuito de la batería un amperímetro registrador, que no es más que un contador *O'K* que gira en un sentido o en el contrario según el sentido de la corriente, y que, por lo tanto, registra la diferencia que hay entre la cantidad de electricidad producida por la batería y la que recibe de la generatriz. Si esta diferencia es demasiado grande, hay que modificar el régimen del elevador de tensión, para lo cual se introduce una resistencia en el circuito inductor. En algunos casos en que la regulación debe ser precisa o rápida, se coloca sobre el inductor shunt un regulador automático (ver *Reguladores*, página 43).

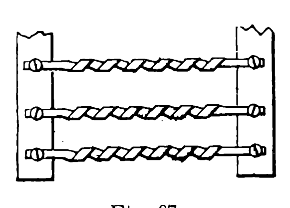


Fig. 27.

Se puede regular la acción del devanado compound mediante pequeñas resistencias en paralelo con el mismo. Esta regulación, hecha de una vez para siempre, se obtiene por medio de resistencias de maillechort en forma de tiras y en número conveniente, dispuestas entre dos barras de cobre en los bornes del compoundaje (fig. 27). En la figura 28 se ven estas resistencias representadas en r'.

Para que las variaciones del flujo inductor produz-

can variaciones apreciables de la f. e. m. del elevador de tensión, es preciso que su punto de funcionamiento

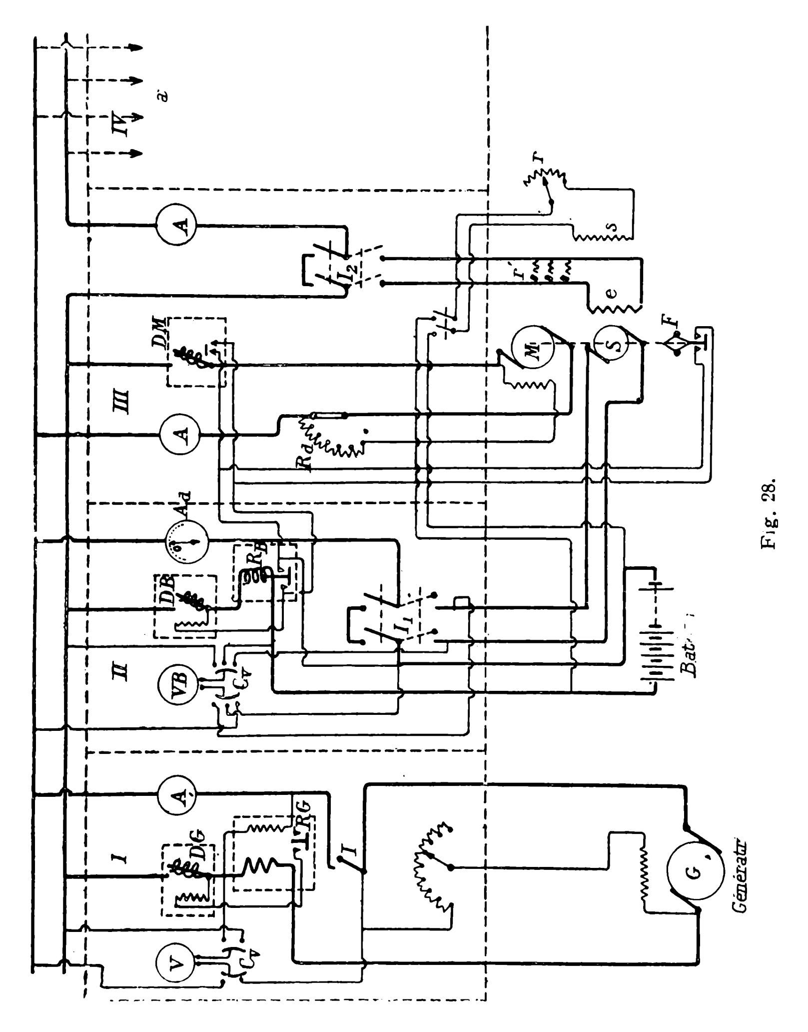


Fig. 28.

esté sobre la parte rectilínea de su característica trazada con su devanado shunt. El efecto de la regulación

consiste en correr la posición de este punto sobre esta curva.

Observación.—Por otra parte, el elevador de tensión debe ser muy sensible a la acción del devanado compound; por consiguiente, no deberá estar saturado para que la superposición de los amperes-vueltas compound tenga por efecto inmediato la variación conveniente de la tensión.

Si el motor *M* está fuera de circuito, puede suceder que el elevador de tensión se dispare; para evitar este accidente, se emplean varios dispositivos, de los cuales el más sencillo consiste en cortar el circuito de la batería por la apertura de su disyuntor de máxima *DB*. Con este fin, se disponen en el disyuntor *DM* del motor de arrastre, contactos auxiliares que cierran el circuito del relevador del disyuntor *DB*. Un dispositivo de fuerza centrífuga *F* colocado en el extremo del árbol del grupo elevador da también la apertura del disyuntor *DB*.

El voltímetro *VB* de la batería tiene un conmutador bipolar de varias direcciones que permite medir la tensión en las barras, en los bornes de la batería y en los bornes del elevador de tensión (fig. 28).

En el momento de la puesta en servicio, el voltaje del sistema batería-elevador debe ser igual al de la línea.

Los aparatos necesarios para una disposición como la que acabamos de describir son, aparte de los disyuntores de que hemos hablado: un interruptor de dos direcciones I_1 que sirve para poner fuera de circuito el elevador, y otro interruptor bipolar I_2 de dos direcciones recorrido por la corriente total de la línea, y que sirve para suprimir el compoundaje del elevador. El disyuntor *DG* de la generatriz funciona a intensidad máxima y a retroceso de corriente.

Si la máquina *G* es una generatriz compound o una conmutatriz, el devanado compound del elevador está dividido en dos partes, una atravesada por la corriente

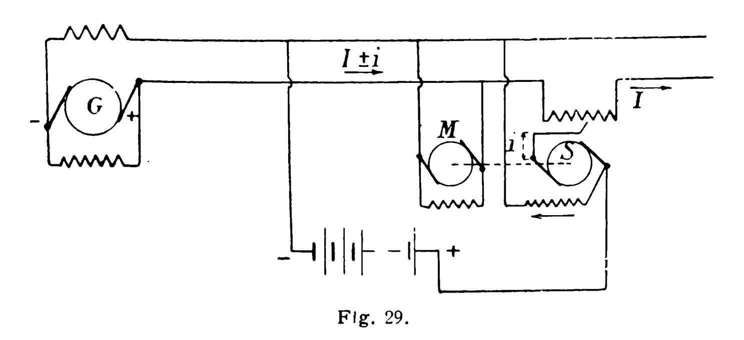


Fig. 29.

de la red, y la otra por la corriente de la máquina de alimentación (fig. 29).

VI. **Instalación de una batería de acumuladores.**— La batería debe instalarse en un local bien aireado, al nivel del suelo. Sucede a veces que hay necesidad de instalarla en alguno de los pisos altos de un edificio; en este caso, la disposición de los elementos debe estudiarse de modo que la carga se reparta de la manera más conveniente para la buena utilización de las vigas del piso. Los muros deben estar recubiertos de una mezcla inatacable por los vapores ácidos; las losetas esmaltadas son excelentes, desde este punto de vista. El suelo debe ser fácilmente lavable.

Hay que tomar todas las precauciones posibles para evitar la acumulación de gases explosivos, debiendo haber una buena ventilación para dar salida a los gases desprendidos. La iluminación ha de estar producida por lámparas de incandescencia de doble cubierta, y nunca debe haber en estos locales motores al descubierto.

La red de alumbrado del local también ha de ser estudiada de modo que resulte inatacable por los vapores que se desprenden. Los vasos de los acumuladores se colocan en filas de modo que cada uno esté separado de su inmediato por una distancia que permita retirar un vaso en caso de avería. Sobre el suelo se coloca un

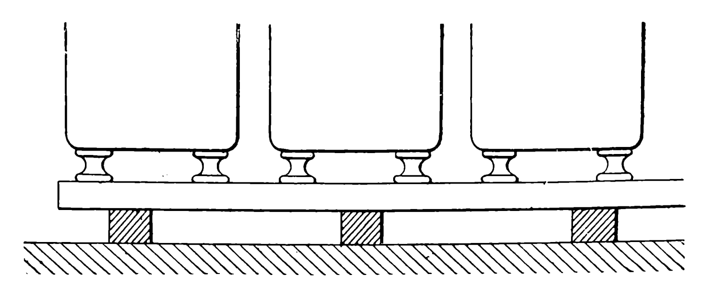


Fig. 30.

bastidor de madera en el sentido de las filas de acumuladores, y sobre este bastidor se fijan bloques aisladores (cuatro por acumulador), colocándose después los vasos directamente sobre estos bloques (fig. 30).

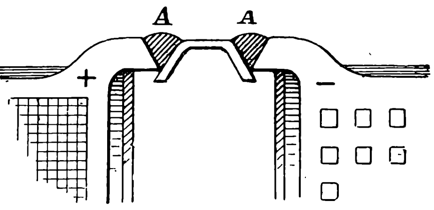


Fig. 31.

Los vasos son de vidrio, y a veces de ebonita, cuando tienen pequeñas dimensiones; para grandes capacidades se emplean cubetas de madera forradas interiormente con una hoja de plomo.

Las conexiones entre los distintos elementos se

establecen con una lámina de plomo doblada en forma de trapecio y soldada por los dos lados menores a las placas de los dos elementos inmediatos. La soldadura se hace autógena; las partes que hay que soldar se limpian bien, y una vez puestas en su sitio, se vierte plomo fundido de modo que llene el espacio *A* (fig. 31); después de apretar, entre dos placas de palastro, los extremos de las dos placas y la conexión basta con un pequeño mechero de acetileno y aire para obtener el calor suficiente. Las tomas de corriente se sueldan sobre la conexión, para lo cual se coloca una vaina de plomo de modo que abrace una cierta longitud de la barra de cobre (fig. 32). La barra de conexión está estañada en una longitud de 40 a 50 cm. para evitar la formación de sales de cobre que destruirían el contacto.

Excepcionalmente, si una conexión está fijada mediante tornillos y pernos, conviene untar toda la pieza de contacto con parafina o con una grasa neutra para impedir la acción del ácido sobre el cobre, salvo, claro está, la superficie de contacto, que debe estar limpia y pulimentada.

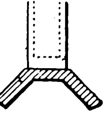


Fig. 32.

Los vasos son lo bastante profundos para que puedan formarse depósitos por debajo de las placas; este depósito formado por la caída de la materia activa debe ser extraído (por sifón) de tiempo en tiempo. Cuando hay que retirar un elemento de la batería, se unen los dos elementos inmediatos con un *puente;* entonces se coloca el elemento de repuesto vacío, y se llena de agua acidulada en el momento de elevar el puente (1).

(1) Para la utilización y entretenimiento de los acumuladores, ver tomo I «Generalidades», pág. 91.

VII. **Generatrices acopladas en paralelo.** — Las máquinas destinadas a funcionar en paralelo deben tener características todo lo semejantes que sea posible, y su mejor marcha se verifica cuando tienen la misma velocidad y dan la misma potencia. Estas condiciones no son indispensables, pero se deberá procurar acercarse a ellas en todo lo posible.

El acoplamiento se efectúa según las necesidades de la red; una generatriz se pone en servicio en cuanto la carga resulta excesiva para la máquina que está funcionando. Siendo máximo el rendimiento para un régimen cercano a la plena carga (potencia que se llama económica), hay que esforzarse en repartir la

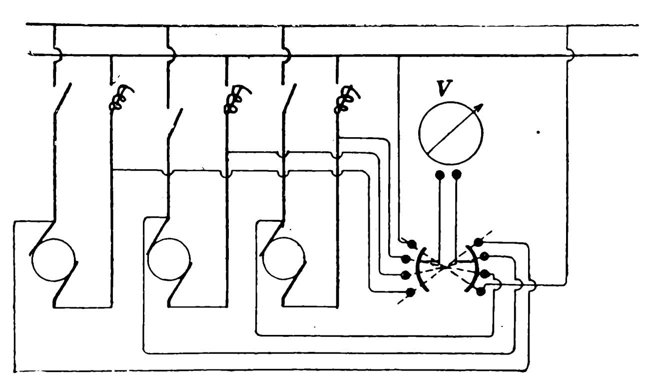


Fig. 33.

corriente sobre las generatrices de modo que se tenga el menor número de máquinas en servicio y la máxima carga posible para cada una.

En el momento de hacer el acoplamiento, se lleva el voltaje de la máquina que se va a acoplar, al valor exacto del voltaje de la red, por medio del reostato de campo, y después se cierran los interruptores.

La comprobación de la tensión se obtiene frecuen-

temente por medio de un conmutador de direcciones múltiples que dé a voluntad, mediante un mismo voltímetro, la tensión entre las barras y en los bornes de cada máquina (fig. 33).

Al cerrar los interruptores, hay que empezar siempre por los disyuntores automáticos, para que éstos puedan abrirse en caso de no resultar bien el acoplamiento. Una vez hecho el acoplamiento, se aumenta la corriente inductora en la máquina puesta en servicio, mediante su reostato de campo, al mismo tiempo que se disminuye la de las máquinas anteriormente utilizadas hasta obtener una distribución conveniente de la carga (¹).

Los disyuntores de cada una de las máquinas, como tienen que funcionar en paralelo, están mandados por relevadores de retroceso de corriente y de intensidad máxima.

Máquinas compound.—El punto de unión del devanado serie con el inducido se lleva al cuadro mediante un conductor de sección igual a la del conductor principal; para cada máquina se une este conductor a un borne de un interruptor unipolar cuyo otro borne está conectado con la barra de equilibrio. Los dos conductores principales están unidos a las barras ómnibus a través de dos disyuntores automáticos. El cable que sale del devanado compound puede tener un disyuntor simplemente de máxima, estando el polo opuesto de la máquina cortado por un disyuntor de máxima y de retroceso de corriente; este último conductor lleva también el amperímetro de la máquina, pues la medida de la corriente sobre el otro polo quedaría alterada por la corriente que pasa por el hilo de equilibrio.

Para hacer el acoplamiento en paralelo, se cierra

(¹) Ver tomo I «Generalidades», pág. 279.

primeramente el disyuntor *D*, y después el interruptor de equilibrio *I*; el voltaje se lleva entonces a su valor conveniente por medio del reostato de campo, y por último, se cierra el disyuntor *D'* (fig. 34).

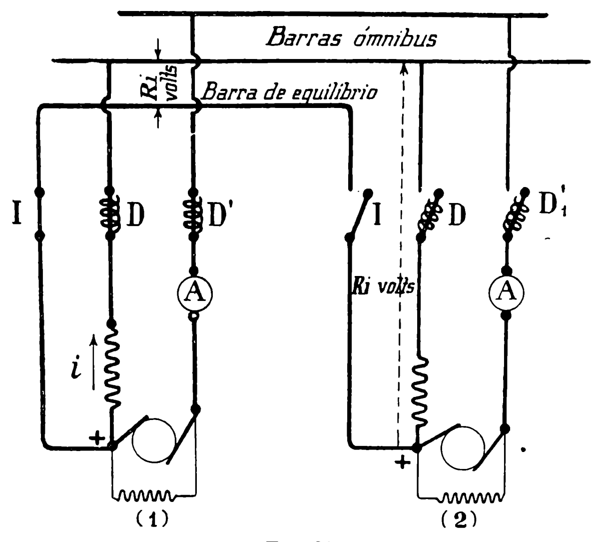


Fig. 34.

El circuito de equilibrio debe cerrarse en primer lugar por la razón siguiente: a causa de la resistencia de los devanados compound y bajo la influencia de la corriente que los recorre, se establece una diferencia de potencial entre la barra de equilibrio y el extremo de los devanados, y por consiguiente, entre una barra ómnibus, la positiva, por ejemplo, y la barra de equilibrio. Supongamos, pues, que la máquina 1 está en servicio; se cierra en primer término el interruptor *I* y el disyuntor *D'* de la máquina 2, y se regula su tensión, cerrando después el disyuntor *D*; en este momento la excitación serie de 2 es atravesada bruscamente por una corriente bajo la influencia de la ten-

sión que hay entre la barra + y la de equilibrio, lo cual produce una elevación violenta de la tensión de 2, y por lo tanto, una carga brusca muy elevada. Por consiguiente, no se cerrará el disyuntor D' sino después de haber cerrado D e I, habiéndose elevado ya la ten-

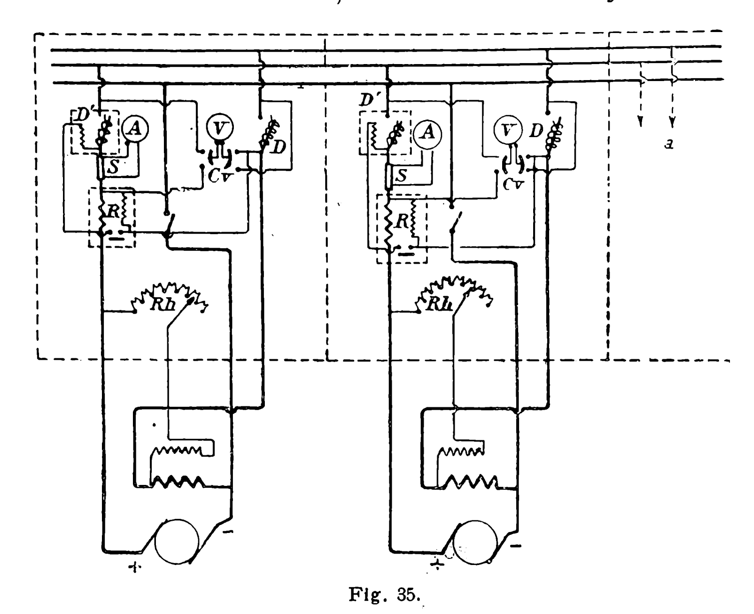


Fig. 35.

sión de la máquina 2 al valor de la tensión entre las barras ómnibus.

Esta operación requiere una precaución para el cierre de D', que debe poderse abrir inmediatamente si el acoplamiento resultara defectuoso. Para ello, se agrega al disyuntor D' un interruptor de mano, o como se hace más frecuentemente, se coloca en el escape del disyuntor un dispositivo mecánico que en caso de sobrecarga corte el circuito, a pesar del esfuerzo de la mano del operador. El montaje del cuadro se hace como indica el esquema de la figura 35.

Generatrices y regulatrices para las distribuciones con varios hilos

La ventaja principal de las distribuciones de varios hilos consiste en la economía de los conductores de línea. Para una misma tensión y una misma pérdida consentida en la línea, si la sección de los conductores necesaria para una distribución de dos hilos está representada por 100, solamente es 31,5 para una distribución de tres hilos y 15 para una distribución de cinco hilos, teniendo los hilos neutros una sección igual a la mitad de la de los hilos principales.

La figura 36 es el esquema de una central que distribuye la energía por tres hilos. Se ve que los *feeders* pueden ser alimentados directamente por las generatrices o por elevadores de tensión en serie con las generatrices (fig. 37). La tensión en los extremos de los *feeders* está dada por un voltímetro unido al centro de distribución de estos *feeders* por hilos pilotos, y puede regularse para cada *feeder* por un reostato en serie con el mismo. En el momento de tenerse las cargas fuertes, que provocarían una caída de tensión importante, se derivan los *feeders* sobre los elevadores de tensión en serie con las generatrices, y se regula la tensión para el *feeder* más cargado, mediante la velocidad del motor del grupo elevador y el reostato de campo de la generatriz; los *feeders* menos cargados quedan entonces sometidos a una tensión excesiva; la tensión entre sus extremos se reduce a su valor normal por medio de los reostatos correspondientes.

La barra neutra puede ponerse a tierra. Dos voltímetros, colocados uno entre la barra + y tierra, y el otro entre la barra — y tierra, permiten darse cuenta del aislamiento de los *feeders* [1].

[1] Tomo II, «MEDIDAS ELÉCTRICAS INDUSTRIALES», pág. 86.

Feeder I (+)

Hilos pilotos

Voltímetro para la tensión en el extremo de los feeders (+ neutro)

Feeder II (+)

Hilos pilotos

Reostato de feeder

Reostato de feeder

Barra de sobretensión

Barras de arranque de los feeders

Conmutador

Conmutador

Barra de las generatrices

Contador totalizador (Energía tomada por los puentes +)

Voltímetro (puente positivo)

Neutro

Generatrices

Feeder I (neutro)

Feeder II (neutro)

Toma de tierra

Voltímetro de las barras a sobretensión

Barra neutra arranque de los feeders

Voltímetro de aislamiento

Voltímetro de aislamiento

Voltímetro de las barras a sobretensión

Reostato de arranque y acelerador

Generatriz

Motor

Grupo elevador de tensión de los feeders

Reostato de arranque y acelerador

Generatriz

Motor

Grupo elevador de tensión de los feeders

Feeder I (–)

Hilos pilotos

Voltímetro para la tensión en el extremo de los feeders (–neutro)

Feeder II (–)

Feeders I (centro de distribución)

Reostatos de feeders

Conmutador

Conmutador

Barras de arranque de los feeders

Contador totalizador (Energía tomada por los puentes –)

Voltímetro (puente negativo)

Neutro

Reductor de descarga

Batería

Reductor de carga

Arranque y acelerador

Motor

Generatriz

Grupo elevador de tensión de la batería

Fig. 36.

Roberjot, V.

Para mantener la igualdad del voltaje en los dos puentes, cuando éstos están cargados desigualmente,



Fig. 37.

se utiliza una batería de acumuladores cuyo punto medio se une con la barra neutra.

Regulatrices y máquinas compensadoras. — Si el centro de utilización está lejos de la central generatriz,

para evitar los gastos excesivos de la instalación de tres hilos, sólo se llevan al punto de utilización los dos hilos extremos, y el tercero, el hilo neutro, parte de este punto. El equilibrio de los puentes se conserva a pesar de la diferencia de carga que pudiera producirse, por un grupo de dos máquinas idénticas cuyos inducidos

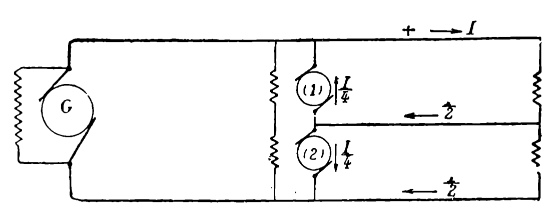


Fig. 38.

están montados sobre un mismo árbol. Estos inducidos están derivados en serie entre los hilos extremos, y el neutro parte de su punto común. Los inductores idénticos están también en serie entre los hilos extremos (fig. 38). Estas dos máquinas desarrollan, por consiguiente, fuerzas electromotrices iguales y, salvo la pequeña diferencia debida a las resistencias interiores, las diferencias de potencial entre sus bornes son iguales. Cuando las cargas tomadas por los dos puentes son iguales, las dos máquinas funcionan como receptores en vacío, y consumen muy poco. Si el puente +, por ejemplo, está más cargado que el puente —, la máquina 1 derivada sobre el puente + funciona como generatriz y absorbe energía mecánica, que le es suministrada por la otra máquina 2, que funciona como motor. La diferencia entre las corrientes en los hilos extremos, al pasar por el hilo neutro, se divide en dos partes, una que pasa a la máquina 1, y la otra a la máquina 2.

La potencia de cada una de estas compensadoras

debe ser tanto mayor cuanto más elevada pueda ser la diferencia de carga entre los dos puentes.

Supongamos que la corriente en uno de los hilos extremos pueda hacerse igual al doble de la corriente en el otro hilo extremo, es decir, I para el primero e $I:2$ para el segundo; la corriente en el hilo neutro es entonces $I - \frac{I}{2} = \frac{I}{2}$ y por lo tanto, pasa a cada máquina del grupo compensador una corriente igual a $\frac{I}{4}$.

La potencia de la generatriz G, de fuerza electromotriz E, es aproximadamente EI, y la potencia de cada máquina del grupo es $\frac{E}{2} \times \frac{I}{4} = \frac{EI}{8}$, o sea la octava parte, aproximadamente, de la potencia de la generatriz G.

En realidad, se toman las precauciones convenientes para obtener un desequilibrio menor y la potencia de las compensadoras es menor.

Aparatos; arranque. — Los aparatos necesarios para un grupo de equilibrio son: dos disyuntores de máxima que unan los puntos extremos de los inducidos con las barras, y un interruptor de mano que una el punto medio con el hilo neutro. Entre uno de los polos extremos y el inducido correspondiente hay intercalado un reostato de arranque; este reostato está calculado para la tensión entre extremos, considerándose el sistema de los dos inducidos como uno solo. El grupo arranca como un motor ordinario.

Excitación. — Para mejorar el equilibrio de los puentes, se pueden cruzar las excitaciones, como indica la figura 39. Si el puente B tiene una tensión ligeramente inferior a la del puente A, el inducido de B funciona como generatriz, y el de A como motor; a causa de la excitación cruzada, el inductor de A es

recorrido por una corriente que disminuye al mismo tiempo que el voltaje de B, y el grupo tiene una tendencia a girar con mayor rapidez. Por otra parte, la corriente de excitación de B será más elevada que

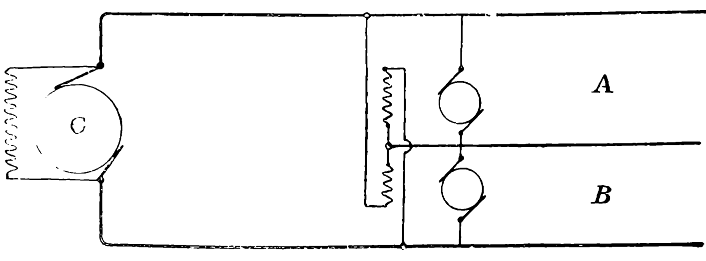


Fig. 39.

si su circuito inductor estuviera derivado sobre el puente B, y de este modo la diferencia de tensión entre los dos puentes es inferior a las caídas en los inducidos. Los resultados siguientes han sido obtenidos colocando de dos modos distintos los circuitos inductores de un grupo compensador entre los hilos extremos:

Diferencia de carga entre los dos puentes	DIFERENCIA DE TENSIÓN	
	Excitación directa	Excitación cruzada
0 amperes	0 volts	0 volts
50 »	8 »	1 »
95 »	14 »	1 »

El desvío de las escobillas de las máquinas que forman grupo de equilibrio debe fijarse exactamente en el cero, ya que los inducidos funcionan indiferentemente como motor y como generadores.

Distribución con cinco hilos.—El grupo de equilibrio está constituído por cuatro inducidos idénticos

acoplados rígidamente. Un reostato de arranque está en serie con los cuatro inducidos; sobre cada uno de los hilos neutros hay puesto un interruptor.

Si se quieren poner en contacto los puntos de unión de los inductores dos a dos con el hilo neutro corres-

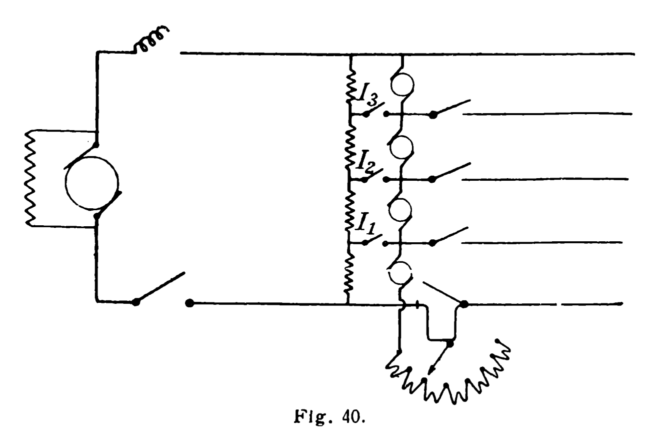
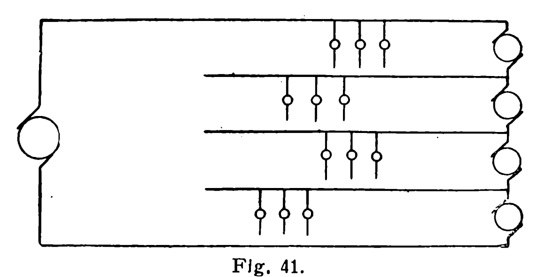


Fig. 40.

pondiente, hay que tener cuidado de hacerlo *después* de haber arrancado el grupo, porque de hacerlo estando éste parado, los devanados ponen en cortocircuito a los inductores I_1, I_2, I_3 (fig. 40).

OBSERVACIÓN.—A veces se agregan a las máquinas de equilibrio baterías de acumuladores cuyos elemen-


Fig. 41.

tos están dispuestos de manera que den en los puentes el voltaje deseado. Para un desequilibrio de corriente

dado, la potencia de las máquinas del grupo queda disminuída, y la batería absorbe o devuelve una parte de la corriente.

Es conveniente derivar un grupo de equilibrio en los extremos de los *feeders* de distribución (fig. 41); de este modo, las caídas de tensión en los extremos son menos apreciables. El funcionamiento es el mismo que cuando el grupo está en el punto de partida de la distribución.

Generatriz de tres hilos.—La generatriz de tres hilos (Dolivo-Dobrowolsky) es una dinamo normal que da entre los bornes la tensión entre los hilos extremos de la distribución, y que tiene además dos anillas conectadas con dos puntos diametralmente opuestos del devanado. Dos frotadores se apoyan sobre estas anillas y están unidos a los extremos de un carrete de autoinducción cuyo punto medio O es el punto de partida del hilo neutro de la distribución (fig. 42). Entre los extremos A y B del carrete hay aplicada una tensión alterna cuyo valor medio es igual a la tensión continua que existe entre las escobillas + y —; este carrete es recorrido, por lo tanto, por una corriente alterna de escaso valor, a causa de su gran reactancia. Es evidente que en todo momento de la rotación del inducido, la diferencia de potencial entre el medio O y el extremo A o la lámina M del colector a que está unida, es igual a la diferencia de potencial entre O y el extremo B o la lámina N a que está unido. Además, la tensión entre

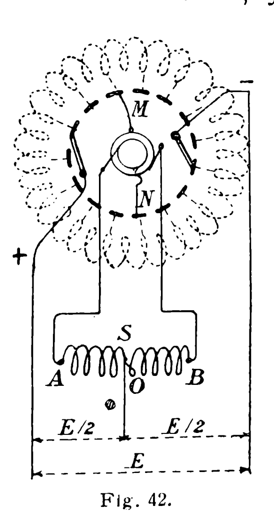


Fig. 42.

M y la escobilla + es en todo instante igual a la tensión entre *N* y la escobilla —.

Por consiguiente, la tensión entre *O* y la escobilla + es en cada momento de la rotación del inducido igual a la tensión entre *O* y la escobilla —, lo cual realiza a satisfacción las condiciones de una distribución con tres hilos.

La sección que hay que dar a los conductores entre el carrete de autoinducción y las anillas es aproximadamente igual a la del hilo neutro, es decir, a la mitad de la de los conductores principales + y —.

El hilo neutro se pone ordinariamente a tierra.

Se prefiere casi siempre un carrete trifásico al carrete de autoinducción simple, haciéndose la distribución de la corriente del hilo neutro al inducido por tres anillas unidas a tres puntos del devanado tomados a 120° uno de otro.

El efecto de esta corriente sobre la reacción del inducido queda mejor equilibrado y la tensión de los dos puentes se iguala mucho mejor también. El punto estrellado del carrete de autoinducción da el punto neutro.

En las máquinas multipolares, las anillas pueden estar unidas por conexiones múltiples a todos los puntos de igual potencial (uno por cada par de polos). De este modo se tiene un circuito equipotencial que hace que el funcionamiento sea bastante mejor.

Regulación automática de la tensión.—En una distribución a tensión constante, hay que hacer una regulación frecuente de la corriente de excitación para sumar a la fuerza electromotriz de vacío, las fuerzas electromotrices necesarias para equilibrar las caídas de tensión variables con el gasto.

Hay varios reguladores automáticos para asegurar la vuelta inmediata del voltaje a un valor constante.

Regulador Thury.—Un pequeño motor derivado entre los bornes de la generatriz produce el balanceo continuo de una palanca *L* que tiene dos trinquetes o escapes, frente a un piñón dentado *P*, sobre cuyo

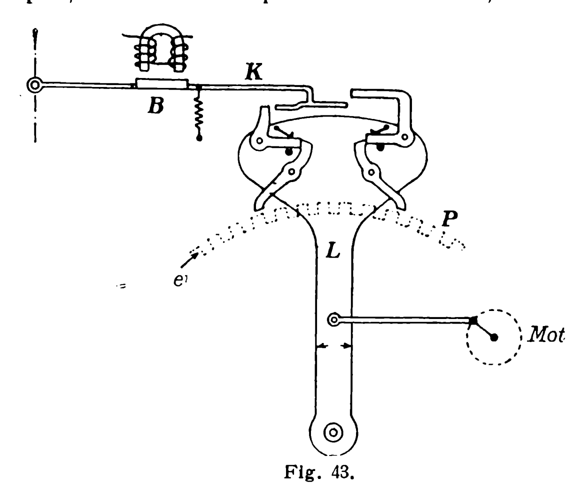


Fig. 43.

eje está fijada la pinza de contacto del reostato (figuras 43 y 44).

Los dos trinquetes corresponden respectivamente a un sentido de rotación del piñón unido a la pinza de contacto. Su acción está determinada por una palanca *K* que obra sobre uno u otro de los trinquetes, los cuales vuelven a su posición de reposo en cuanto la palanca *K* deja de moverse. La intervención de la palanca *K* está regida por una balanza voltimétrica *B*, cuyos devanados están derivados entre los bornes de la dinamo a través de una resistencia en serie. Cuando la tensión tiene su valor normal, los dos trinquetes oscilan constantemente entre los dos mismos dientes del piñón *P* y sin hacer avanzar este piñón.

Si la tensión toma un valor superior al normal, la palanca *K* se mueve en un cierto sentido y su oscila-

ción hace correr, por medio de un enlace no indicado en la figura, a un mismo trinquete por los dientes sucesivos del piñón, cuyo eje arrastra a la pinza de

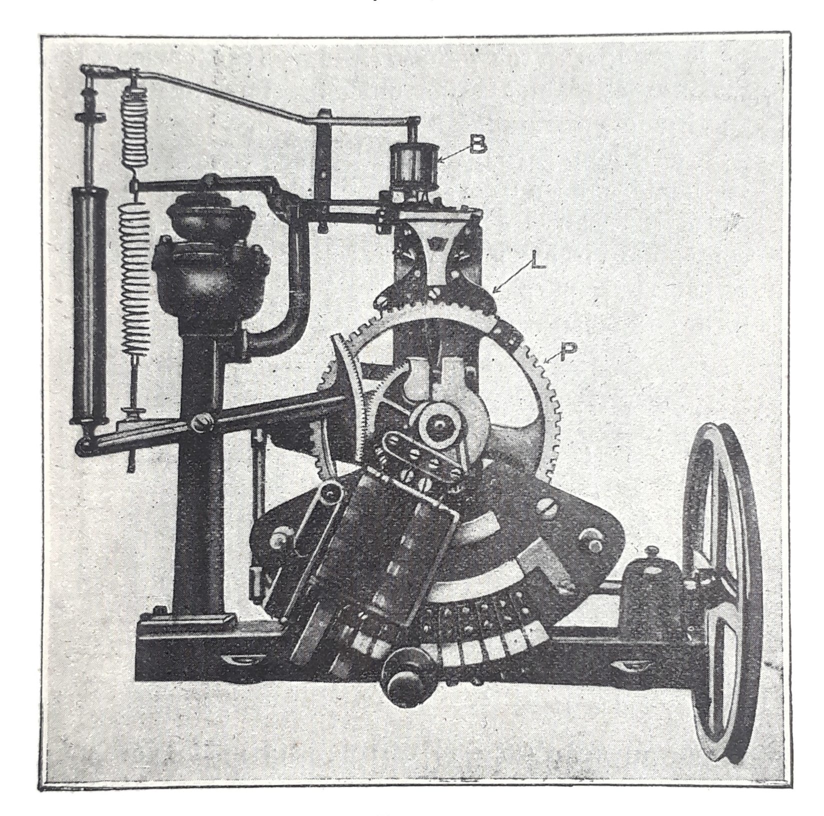


Fig. 44.

contacto del reostato en el sentido de los voltajes decrecientes, hasta que la tensión alcanza su valor normal; entonces la palanca vuelve a la posición para la cual los dos trinquetes están en reposo. Al contrario, si la tensión disminuye, la palanca se mueve en sentido contrario, lo cual hace girar la pinza de contacto del

reostato en el sentido de los voltajes crecientes. La rueda que se ve en la parte inferior de la derecha de la figura 44, unida mediante una correa a la polea de un motorcito, pone en movimiento a la palanca *L*.

Regulador Brown-Boveri.—Las resistencias del reostato de campo están unidas a topes dispuestos en círculo y separadas por aisladores, como las láminas de un colector (fig. 45). En el centro del círculo hay un carrete *B* que puede girar en el campo creado por un imán *NS*; este carrete está unido, por una resistencia en serie, con los bornes de la generatriz y pone en movimiento, por efecto del par voltimétrico, un soporte elástico *O*. Sobre este soporte va una punta metálica, centro de un sector de aluminio *S*, cuyo radio de curvatura es un poco menor que el del círculo del reostato. La posición del punto *O* determina el punto de tangencia de los dos círculos, lo cual da el valor de la resistencia entre el extremo *A* y el borne *B*, unido eléctricamente al sector *S*.

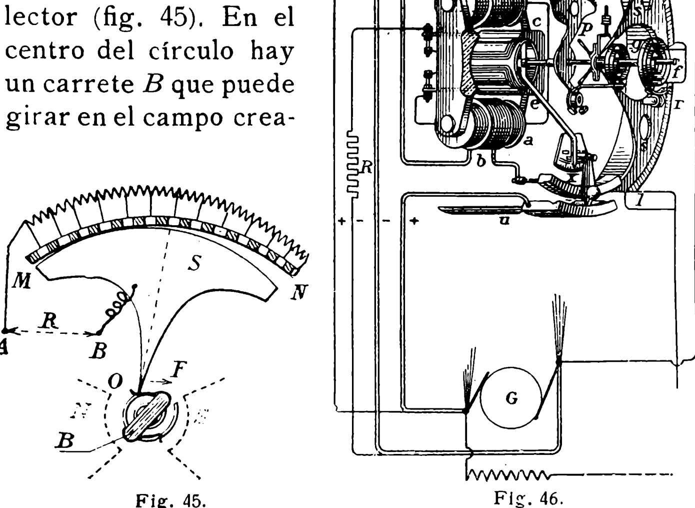


Fig. 45. Fig. 46.

Si la tensión tiende a aumentar, el carrete gira de modo que arrastra en su movimiento a la punta *O* en la dirección *F*, y el contacto del sector *S* con los topes se aleja del extremo *N*, con lo cual aumenta la resis-

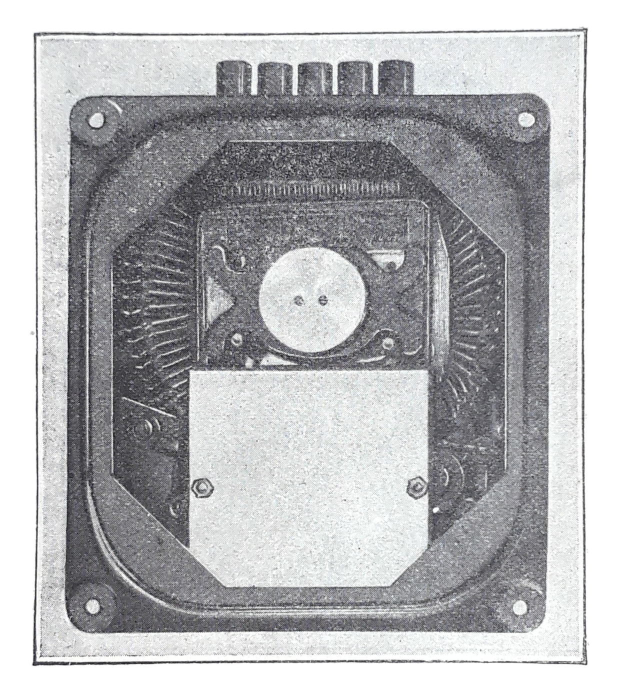


Fig. 47.

tencia, y la tensión vuelve a su valor normal. El par resistente se obtiene con un muelle espiral regulable.

Este regulador, por estar muy poco amortiguado, es de acción muy rápida. Tanto el sector como la parte interna de los topes, están revestidos con una plaquita muy fina de plata.

Para obtener un equilibrio conveniente de la parte móvil, está montado este aparato con dos o cuatro sec-

tores dispuestos simétricamente, como se ve en las figuras 46, 47 y 48, en la primera de las cuales c es un carrete móvil en el campo de un electroimán; a el devanado del electroimán, de hilo fino (estos dos circuitos

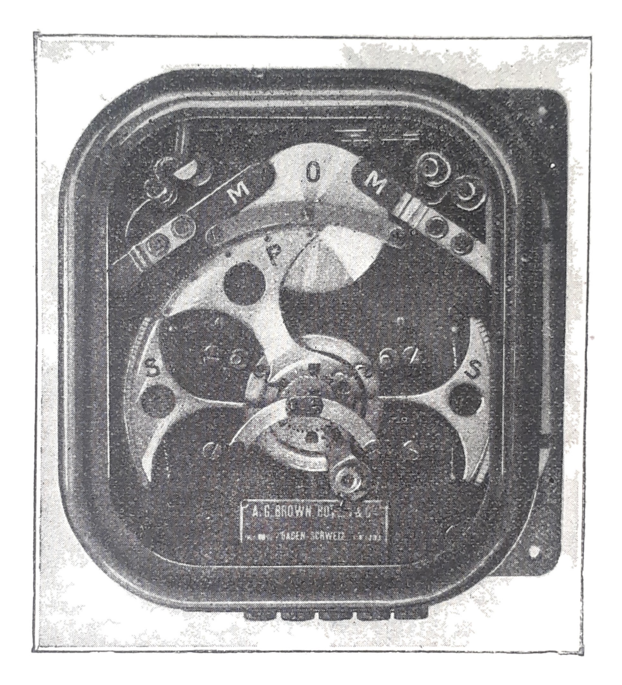


Fig. 48.

están en serie y derivados entre las escobillas de la generatriz G); R es una resistencia fija, en serie con estos circuitos; b, el devanado de hilo grueso del electroimán, terminado en los bornes de G y en serie con una resistencia variable u para la regulación, que se hace con el cursor X; f y g son muelles antagonistas; o un disco que gira entre los polos de los imanes m (amortiguador por corrientes de Foucault); y r es una (resistencia en

serie con el inductor de G y que varía con la posición del sector S, determinada por la tensión en los bornes de G.

Regulador de martillo o vibrante. Regulador Tirill.—El principio en que está fundado este aparato es el siguiente: si el circuito inductor está alimentado por una corriente sometida a una serie de interrupciones que su suceden con gran rapidez, el campo magnético, en virtud de la inercia de imanación y desimanación, será continuo, y todo ocurrirá como si la corriente inductora fuera continua. Pero la intensidad del campo variará con el número de interrupciones por segundo y será tanto menor cuanto mayor sea este número.

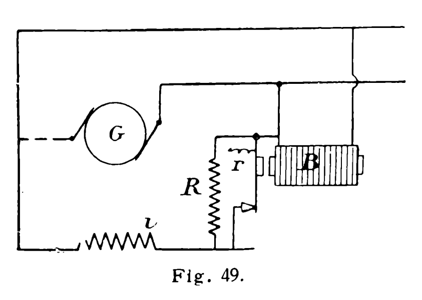


Fig. 49.

El regulador se monta como indica la figura 49; el carrete B está derivado entre los bornes de la generatriz G, y la armadura es una lámina vibrante que pone en cortocircuito una resistencia R, en serie con el circuito inductor de G, cuando no es atraída por el carrete, y que la pone en circuito cuando es atraída por éste. Si la tensión en los bornes de la generatriz sube, aumenta la frecuencia de las oscilaciones de la lámina vibrante, lo cual disminuye el campo magnético y hace que la tensión vuelva a su valor normal. Al contrario, si la frecuencia disminuye a causa de haber bajado la tensión, el campo inductor aumenta. La regulación se hace por medio del muelle r. Los diferentes reguladores vibrantes tienen distintos sistemas de amortiguamiento, a veces, bastante complicados,

siendo la práctica la que indica su regulación exacta.

Reostato de campo.—Consideremos una máquina cuyo reostato de campo haya sido regulado para la carga máxima en frío. La temperatura del circuito inductor se elevará poco a poco y alcanzará unos 40° sobre la temperatura ambiente, de modo que la resistencia R en frío de este circuito aumentará en una cantidad igual a $R \times K \times 40°$ (tomo I, pág. 25), siendo $K = 0{,}004$, es decir, $R \times 0{,}004 \times 40 = R \times 0{,}16$, o sea el 16 °/₀ del valor de la resistencia de los inductores. Por consiguiente, será preciso que se puedan suprimir estas resistencias en el reostato de campo para mantener la corriente de excitación en su valor. En el caso de tener una máquina con su reostato, para el cual no se haya tomado esta precaución, habrá que correr el punto de funcionamiento de la máquina, disminuyendo el entrehierro. Es preciso que el valor de la resistencia en el reostato sea aproximadamente igual a $0{,}16\ R$, y que el circuito esté completamente frío.

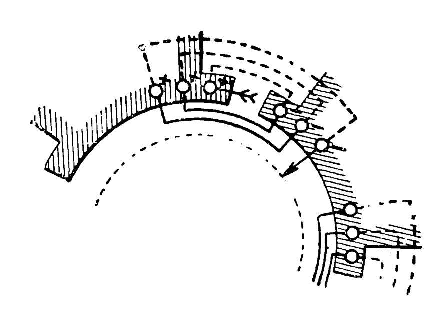


Fig. 50.

Máquinas con devanado de compensación. — Con objeto de combatir el efecto de la reacción del inducido, se construyen, sobre todo para grandes velocidades, máquinas que tienen un devanado llamado de *compensación* (Déri). Este devanado es recorrido por la corriente que produce la máquina, y está formado por conductores alojados en las piezas polares a nivel del entrehierro (fig. 50).

Tanto el eje del devanado como su sentido, son los de los polos auxiliares. Cada uno de los conductores así dispuestos, crea una fuerza magnetomotriz local que tiende a anular los flujos antagonistas y transversales.

La particularidad de una máquina con devanado de compensación bien calculado consiste en que el cero de desvío de las escobillas no se corre con la carga, y en que la caída de tensión debida a la reacción total del inducido queda extremadamente reducida.

El desvío de las escobillas de una máquina de esta clase debe ser objeto de un ajuste extremadamente cuidadoso; los amperes-vueltas de reacción del inducido y los amperes-vueltas de compensación deben estar rigurosamente en oposición, y dar, dentro de lo posible, una suma algébrica nula. Esta condición se cumple con el desvío cero.

Si a causa del desvío de las escobillas, el eje de los flujos de reacción del inducido se corre atrás o adelante

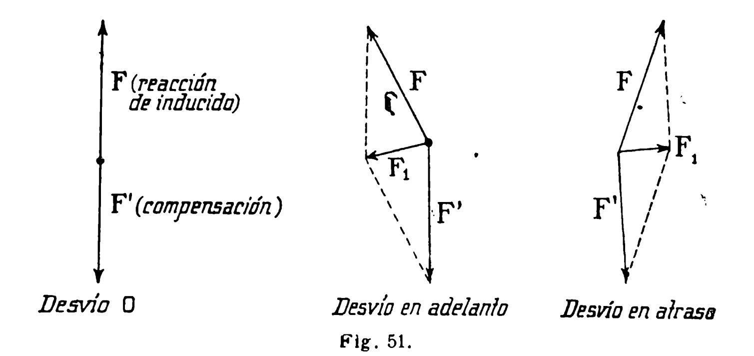


Fig. 51.

de la línea neutra, se establece un flujo F_1, resultante de la composición de los dos flujos F y F', y muy aproximadamente en cuadratura con el flujo de compensación, es decir, en la dirección del flujo principal. Dicho

flujo F_1 se suma al principal para el desvío en atraso y se resta para el desvío en adelanto (fig. 51).

Por consiguiente, si las escobillas están desviadas en adelanto sobre la línea neutra, la máquina tendrá una caída de tensión excesiva, a causa de la disminución de flujo ocasionado por el devanado de compensación. Pero si las escobillas están desviadas en atraso, la máquina presenta una tendencia a obrar como máquina compound, y este caso resulta peligroso, porque el flujo F_1, sumado al flujo principal aumenta constantemente, por crecer sus dos componentes con la carga, de modo que la máquina se dispara, tanto en corriente como en tensión, dando lugar casi siempre a un accidente.

Desvío de las escobillas en una máquina compensada. Método de Picou. — El desvío de las escobillas se determina de antemano de un modo aproximado por un método cualquiera (estático, voltimétrico).

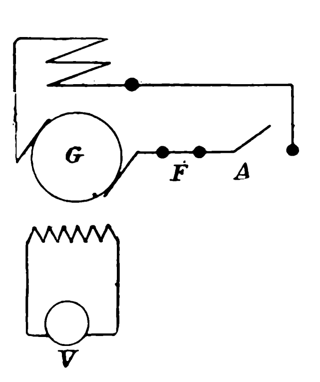


Fig. 52.

Una vez hecha esta determinación se abre el circuito inductor, y se deriva un voltímetro V entre sus extremos. Estando el devanado de compensación normalmente en serie con el inducido, se unen los dos bornes de la máquina con los dos polos de un interruptor A protegido por un fusible F (fig. 52), estando este último circuito en condiciones de resistir una corriente cuyo valor pueda alcanzar del 15 al 26 °/₀ de la intensidad normal.

Una vez en marcha la máquina, se cierra el interruptor A y después se abre; se observa a cada una

de estas operaciones una desviación de la aguja del voltímetro, siendo estas desviaciones de sentido contrario en las aperturas y en los cierres. El desvío de las escobillas se modifica hasta que se observen las desviaciones mínimas, y a ser posible, hasta que no se tenga ninguna desviación. En este momento, los flujos de reacción del inducido y de compensación, están exactamente en oposición.

Trazado de las curvas de distribución de potencial sobre el colector y aplicaciones al ajuste de la conmutación y de la compensación. — La curva representativa de las variaciones de tensión a que está sometida una espira del inducido que se mueve en el entrehierro, permite apreciar la distribución del flujo en la periferia del inducido para los diferentes regímenes. Esta distribución del flujo puede quedar modificada por cambios de forma de las piezas polares o por variaciones de los amperes-vueltas en los circuitos auxiliares. Estudiando las curvas de potencial pueden hacerse observaciones muy útiles que sirvan para esclarecer la cuestión, siempre complicada, de la conmutación.

Procedimientos prácticos para el trazado de las curvas. — En sus estudios experimentales sobre la conmutación, Mauduit expone un procedimiento que permite registrar las variaciones de tensión entre dos láminas con una gran precisión: consiste este procedimiento en unir las dos láminas en cuestión del colector con dos anillas aisladas cuyos frotadores estén unidos a un oscilógrafo.

Para la observación práctica, se siguen procedimientos más rudimentarios, de los cuales el más sencillo es el siguiente: se toma una tira estrecha de cartón fuerte, y se le practican agujeros equidistantes cuyo diámetro sea suficiente para permitir el paso a un lápiz

de carbón de varios milímetros, y cuya distancia sea igual a la que hay entre eje y eje de dos láminas inmediatas del colector. La longitud de esta tira perforada es un poco mayor que la del arco de colector comprendido entre dos filas inmediatas de escobillas. Se fija el extremo de la tira a un portaescobilla y, mediante una cuerda tirante, se hace que se adapte sobre el arco que interesa del colector. Basta entonces medir con dos lápices de carbón, unidos a un voltímetro sensible, las tensiones sucesivas entre dos agujeros consecutivos.

Sobre el eje de las abscisas de dos ejes coordenados se marcan puntos equidistantes que representan las láminas del colector, y se toman como ordenadas las tensiones correspondientes observadas.

De este modo se obtiene una curva que da las tensiones para el régimen que se ha mantenido durante toda la medida.

Estudio de las curvas. — La marcha generalmente observada es la que se ve en la figura 53.

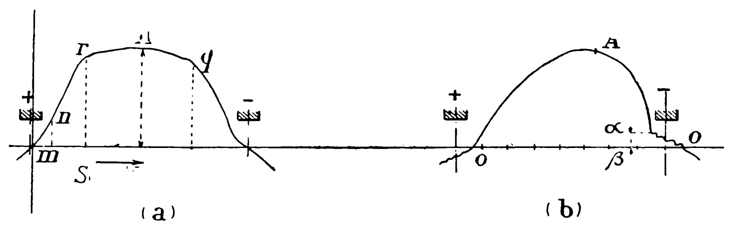


Fig. 53 (flecha *S*, sentido de rotación).

a) Generatriz sin carga, o de vacío. — La parte *mn* de la curva corresponde al espacio interpolar, la parte *nr* al chaflán de la pieza polar, y la parte *rq* a la masa polar;

b) Generatriz en carga. — El vértice *A* de la curva es arrastrado por la distorsión del campo en el sentido de la rotación, estando el punto de tensión cero por

delante del carbón; en la zona del carbón, la tensión es inestable y las chispas producen dientes en la curva. La ordenada media ha disminuído, por la caída de tensión interior.

Es evidente que para un mismo sentido de rotación, si la máquina funcionara como motor, las deformaciones observadas serían de sentido contrario.

Máquinas con polos auxiliares. — La forma de las curvas está dada en este caso por la figura 54. La pre-

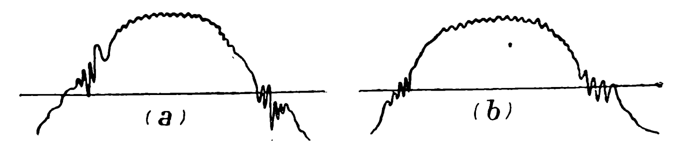


Fig. 54 (*a*, sin polos auxiliares; *b*, con polos auxiliares).

sencia del polo auxiliar establece una parte plana para las láminas que hay bajo las escobillas, tanto más ancha cuanto mayor es la anchura del polo auxiliar. En carga, la distorsión del campo se nota siempre, pero la parte plana de la curva tiene tendencia a per-

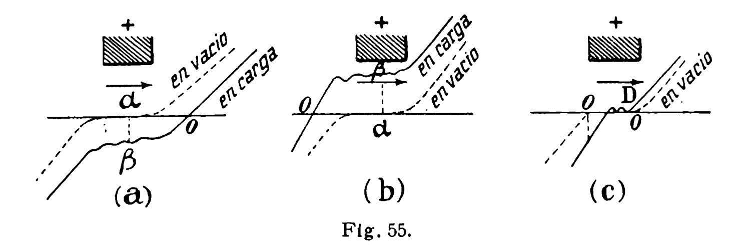


Fig. 55.

sistir, y la ordenada cero continúa bajo las escobillas.

Como se ve, la presencia del polo auxiliar anula la parte αβ de la curva *b* (fig. 53). Si se observan chispas bajo las escobillas, es señal de que esta condición no se cumple. En los tres casos *a, b, c,* de la figura 55, hay

que temer la producción de chispas por las razones siguientes:

a) polos auxiliares excitados de un modo insuficiente;

b) polos auxiliares demasiado excitados;

c) expansiones demasiado estrechas de los polos auxiliares.

En efecto, en el primer caso (*a*), la ordenada cero se ha corrido por delante del carbón, por lo cual la distorsión ha sido más fuerte que la acción del polo auxiliar. Por lo tanto, hay que reforzar esta acción, ya sea disminuyendo el entrehierro de los polos auxiliares, o aumentando sus amperes-vueltas.

En el segundo caso (*b*), la ordenada cero se ha corrido por detrás del carbón, por lo cual el polo auxiliar, no solamente ha anulado el efecto de distorsión, sino que ha producido un flujo de sentido opuesto; luego habrá que disminuir los amperes-vueltas del polo auxiliar o aumentar su entrehierro.

El tercer caso (*c*) parece indicar una buena regulación del polo auxiliar, ya que el cero está por debajo de la escobilla, y bien en el medio de ésta. Sin embargo, se puede temer una marcha defectuosa, pues la diferencia de las ordenadas de *o*, *o* indica una diferencia de potencial bajo el carbón que puede ser excesiva. En la práctica, esta diferencia no debe nunca llegar a ser de 2 volts para las escobillas ordinarias de carbón, y se disminuye ensanchando la expansión del polo auxiliar.

Inestabilidad de marcha. — Se observa a veces, en las máquinas con polos auxiliares, una inestabilidad de corriente, que consiste en que esta última toma un valor oscilante. Esta inestabilidad se produce especialmente en las máquinas sometidas a variaciones de carga, lo cual puede tener graves inconvenientes, porque la amplitud de la oscilación tiene tendencia a aumentar hasta

el momento en que los aparatos de protección entran en juego. Generalmente las máquinas generatrices que presentan este inconveniente dan una curva que tiene la forma de la curva *b* de la figura 55. Los polos auxiliares cuya acción es excesiva, llevan el cero atrás, de modo que se está en el caso de un desvío relativo en adelanto cuyo efecto consiste en hacer bajar la tensión en los bornes. Si la tensión baja, la corriente también baja y el efecto de los polos auxiliares disminuye, volviendo el cero a su sitio bajo el polo, y la oscilación vuelve a tomar con la carga una nueva amplitud.

Para un motor, el cero se corre hacia adelante, pór lo cual hay un desvío relativo en atraso, que tiende a aumentar la velocidad, sobre todo tratándose de un motor que trabaje con par constante.

La observación de la curva de distribución de las tensiones entre láminas a lo largo del colector permite poner remedio inmediato a estos inconvenientes, ya sea por modificación de los polos auxiliares, o por un desvío conveniente de las escobillas.

Máquinas compensadas. — Para las máquinas con polos auxiliares es a veces suficiente el trazado de la parte de curva correspondiente a la región bajo las escobillas; pero tratándose de las máquinas compensadas es casi indispensable el trazado de toda la curva; de este modo es posible observar el efecto del devanado compensador sobre la totalidad del intervalo comprendido entre dos líneas neutras.

El ejemplo dado por la figura 56 se refiere a una máquina de 1260 amperes bajo 240 volts y una velocidad de 590 vueltas. La conmutación es buena; las escobillas están desviadas en adelanto, aproximadamente en unas dos láminas. Las curvas se han trazado marchando la máquina de vacío, en cortocircuito y en carga.

Para la curva en carga, las ordenadas tienen aproximadamente por valor la suma de las ordenadas de las otras dos curvas, lo cual induce a pensar que en caso de imposibilidad de cargar una máquina, se puede

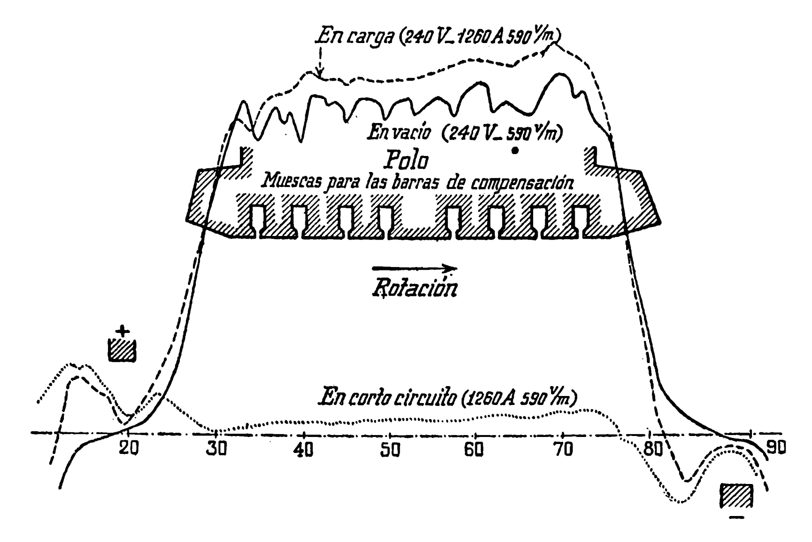


Fig. 56.

regular su conmutación observando las dos curvas de vacío y de cortocircuito. La generatriz a que se refiere este ejemplo tiene ocho barras de compensación bajo las piezas polares; los dientes de la curva en vacío se deben a las muescas en que van alojadas estas barras. De la curva en cortocircuito se puede deducir que la compensación es algo débil, por elevarse la tensión a uno y otro extremo del polo. La curva en carga pone bien de manifiesto la existencia de una distorsión; el vértice está claramente bajo el extremo o lado de salida. Sin embargo, el funcionamiento es bueno. Los chaflanes de las piezas polares, por ser cortos, dan

lugar a una caída brusca de la curva. El carbón que cubre tres láminas no da lugar a chispas.

Procedimiento de inscripción de toda la curva. — Para trazar la curva entera entre dos polos consecutivos, se sustituye el procedimiento que hemos expuesto por el siguiente: en lugar de un voltímetro ordinario derivado entre los dos lápices de carbón, se dispone un aparato registrador de vuelta rápida, es decir, cuya rotación completa dure un minuto. Durante este minuto se corren sobre el colector, con una velocidad uniforme, los dos lápices colocados a una distancia constante correspondiente a la distancia que hay entre dos láminas consecutivas; esta distancia no importa que no sea rigurosamente exacta, si se quiere obtener la forma de la curva, y no su tamaño.

Para las máquinas normales, la tensión máxima entre dos láminas consecutivas es de 12 volts aproximadamente, lo cual fija la sensibilidad del voltímetro que hay que emplear en estos trazados.

CAPÍTULO II

Centrales de corriente alterna

Excitatrices. — Como un alternador no puede excitarse por sí solo, hay que agregarle un generador de corriente continua, para la alimentación de sus inductores.

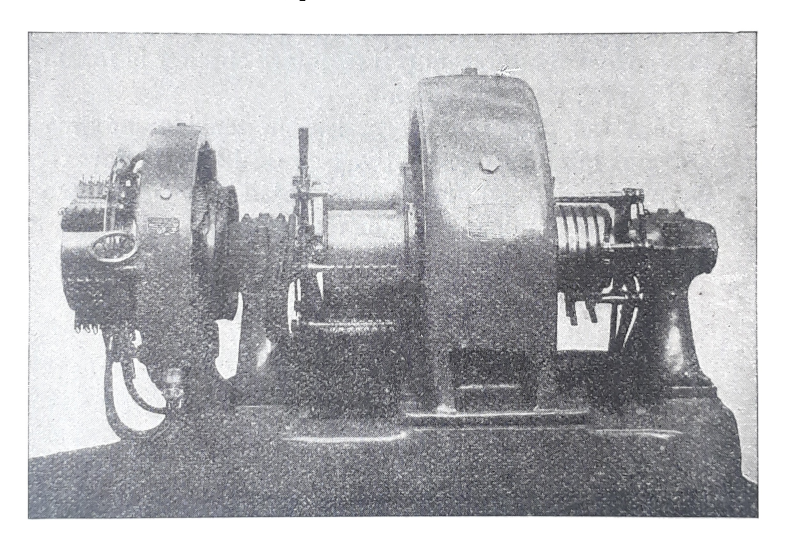


Fig. 57.

tores. Es muy raro emplear acumuladores o un generador ajeno a la estación (como en el caso de estar muy cerca una subcentral, por ejemplo), sino que casi siempre se hace uso de una *excitatriz*.

Una excitatriz es una generatriz de corriente continua cuya característica se estudia, en general, sólo para la corriente en los inductores del alternador. La excitatriz se pone en movimiento por el árbol mismo del alternador, o por un motor especial.

La excitatriz colocada en el extremo del árbol del alternador está muy indicada para los alternadores de gran velocidad angular (fig. 57), es decir, de pocos polos. Para los alternadores lentos, la pequeña velocidad requiere dimensiones excesivas en la excitatriz, por lo cual es preferible utilizar un grupo especial de excitación, sobre todo para las máquinas grandes.

Característica de una excitatriz. — La excitatriz puede ser una generatriz serie; en este caso, la regu-

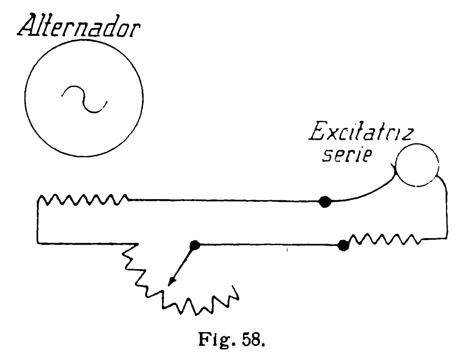


Fig. 58.

lación de la tensión del alternador se hace con un reostato colocado en el circuito único de excitación (fig. 58). La resistencia de este reostato debe ser tal que pueda hacer bajar la corriente máxima I_{max}, que es la corriente de excitación que corresponde a la tensión normal del alternador en plena carga, hasta el valor I_0, que es la corriente que da esta tensión en vacío; también es preciso que haya una resistencia disponible igual a 0,20 R, siendo R la resistencia de los inductores

del alternador, para tener la tensión en vacío y *en frío*.

Por consiguiente, si R es la resistencia en caliente del circuito inductor, la potencia de la excitatriz debe ser RI^2_{max} watts.

Para los alternadores de gran potencia, en los cuales la corriente de excitación es elevada, el reostato de regulación dispuesto como hemos dicho es demasiado voluminoso, pues la sección del hilo que forma la resistencia debe ser bastante grande, a causa de la intensidad de la corriente, y la resistencia total ha de ser muy grande para hacer bajar suficientemente la corriente de excitación, para las pequeñas cargas.

Un reostato de esta clase es muy costoso, y hace perder una gran cantidad de energía. Es preferible emplear una excitatriz shunt cuyo régimen de marcha

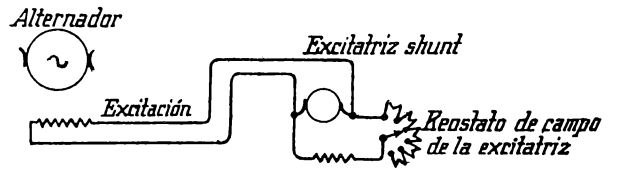


Fig. 59.

esté determinado por la resistencia del circuito inductor del alternador y los valores extremos de la corriente que debe recorrerla. La regulación de la corriente de excitación se hace con el reostato de campo de la excitatriz (fig. 59).

La corriente en el inductor del alternador varía generalmente de uno a dos, es decir, en el 100 por 100 al pasar de la marcha en vacío a la marcha en carga, por lo cual la tensión en los bornes seguiría esta variación, ya que es constantemente igual a RI, y R es casi constante. El régimen de la excitatriz será, por consiguiente, muy difícil de mantener *estable* por va-

riar el punto de funcionamiento de un modo continuo. Para mantener la mayor estabilidad de marcha, se busca para la excitatriz una característica externa

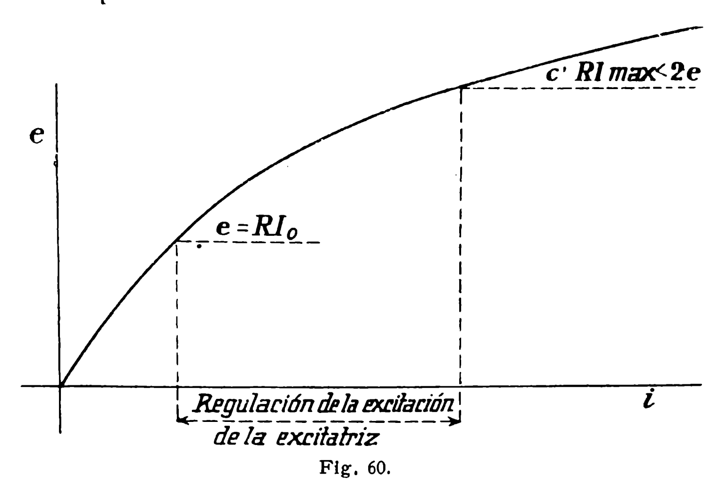


Fig. 60.

correspondiente a grandes variaciones de su excitación propia (fig. 60).

Una máquina de esta clase tiene en general un entrehierro considerable; para realizar prácticamente esta disposición, Brown Boveri procede del modo siguiente: las piezas polares están cortadas de manera que crean un entrehierro importante, y para facilitar el cebado de la máquina hay una serie de placas delgadas separadas en algunos milímetros, que prolongan la pieza polar hasta la dimensión normal. Para facilitar esta disposición, todo el cuerno polar es de hierro laminado (fig. 61).

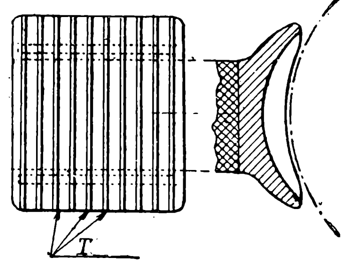


Fig. 61.

Regulación automática de la tensión.—La regulación de la tensión puede obtenerse automáticamente, como hemos visto para las máquinas de corriente continua; el regulador obra sobre la corriente de excitación aumentando las resistencias del reostato de campo de la excitatriz si la tensión del alternador tiende a pasar del valor normal, y quitando resistencias si la tensión tiende a bajar.

Entre los reguladores, citaremos el aparato construído por la Sociedad Brown Boveri y C.ª, que ya hemos descrito para las máquinas de corriente continua (figs. 47 y 48).

El aparato, móvil bajo la influencia de las variaciones de la tensión del alternador, y que obra sobre el

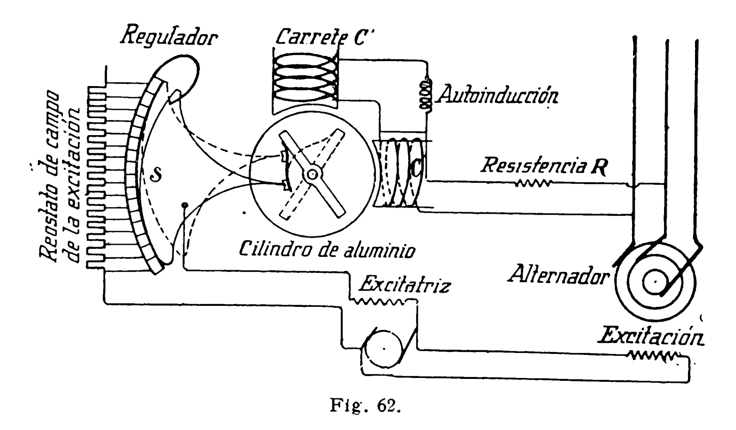


Fig. 62.

reostato de campo de la excitatriz, está constituído por un cilindro de aluminio (fig. 62) apoyado sobre dos gorrones terminados en punta, y a su alrededor hay dispuestas piezas polares que llevan los carretes *CC'*. Estos devanados *CC'* son recorridos por corrientes alternas producidas por la tensión entre dos hilos de líneas que parten de los bornes del alternador, de modo que

se produce un campo giratorio a través del tambor de aluminio. Estos devanados están unidos a los dos hilos de líneas a través de una resistencia en serie *R*, y sobre uno de ellos, *C'*, hay un carrete de autoinducción de modo que se produzcan dos campos defasados en 90° uno sobre otro, y por consiguiente, un campo giratorio. Este campo produce corrientes inducidas en el disco de aluminio con lo cual se crea un par que tiende a hacer girar al disco, siendo este par tanto mayor cuanto más intensas son las corrientes en los devanados, y por consiguiente, cuanto más elevada es la tensión entre las líneas. Bajo la influencia de este par, equilibrado por un par antagonista producido por muelles, gira el sector móvil *S*, pasando sobre los topes o contactos del reostato, y regulando así la tensión.

De un modo parecido se adapta el regulador Tirill a los alternadores.

Regulador electromecánico Routin.—Este regulador tiene la notable propiedad de adecuar la velocidad de la maniobra de regulación a la importancia de la variación que se trate de corregir, mientras que en los otros procedimientos, el órgano encargado de la corrección se mueve con una velocidad constante, independiente siempre de la importancia de las variaciones que hay que corregir. Tomamos la descripción de este regulador (fig. 63) del artículo publicado por Routin en la «*Lumière Electrique*».

1 es la cruz de una balanza móvil alrededor del punto 2.

3 es un carrete suspendido de la cruz 1, y sobre el cual el campo magnético creado por los carretes 4 y 5 desarrolla un esfuerzo vertical dirigido de arriba abajo; 3, 4 y 5 están en serie con una resistencia auxi-

liar 6, y este circuito está unido a los bornes del generador cuya tensión se trata de regular.

Las flechas indican el sentido de las líneas de fuerza creadas por 4 y 5.

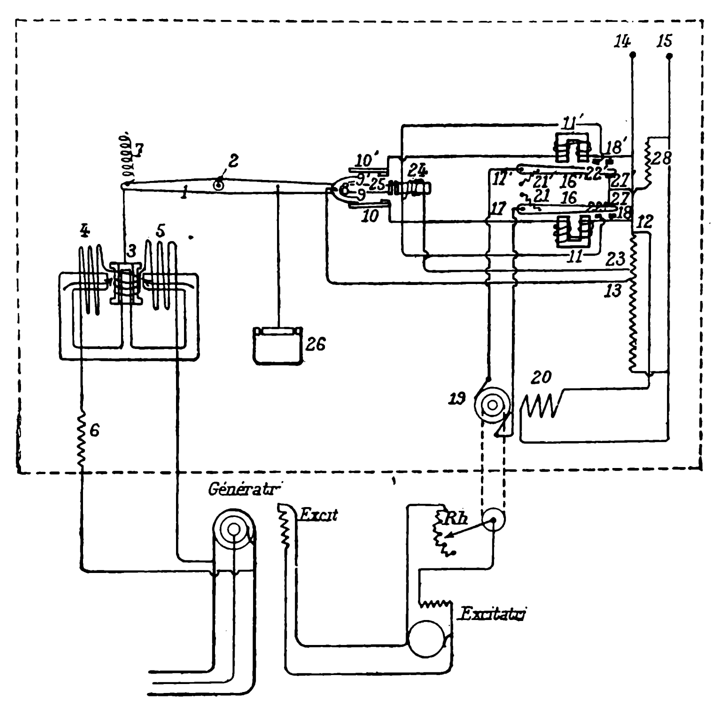


Fig. 63.

Cuando, por ejemplo, la tensión es demasiado baja, el par antagonista desarrollado por el muelle 7 es superior al par producido por 3; la cruz de la balanza se inclina y se establece un contacto entre el polo 9 del imán 8 y un hilo de acero 10, fijado al bastidor del aparato por medio de un soporte aislador.

El circuito del electroimán 11 es recorrido entonces

por una corriente derivada entre los puntos 12 y 13 de una resistencia utilizada como potenciómetro y unida en 14 y 15 a un generador de corriente continua.

El electroimán 11 atrae a su armadura 16, que al oscilar alrededor de 17 toca con 18; el inducido 19 del motor que mueve al reostato empieza a girar en un sentido tal que hace aumentar la excitación; su inductor 20 está unido de un modo fijo por 14 y 15 al generador que da la corriente continua.

En cuanto se corta el contacto entre 9 y 10, la palanca 16, llamada por el muelle 21, se pone en contacto con 27; las dos escobillas de 19 se encuentran de este modo en cortocircuito, lo cual produce la parada brusca del inducido por frenado electromagnético.

El contacto 18 está montado sobre un muelle. En cuanto la armadura 16 toca con 18, se pone en contacto con 23, estableciéndose una corriente de 12 a 23 que pasa por el electroimán 24.

Este electroimán obra entonces de abajo hacia arriba sobre la armadura 25, fijada a la cruz 1 de modo que produce la ruptura de contacto entre 9 y 10 antes de haberse vuelto a restablecer el equilibrio. De esta manera se hace entrar en acción un par complementario que, si fuera permanente, provocaría una regulación a tensión demasiado débil; pero este par desaparece en cuanto 9 se aleja de 10, pues 16 se separa en seguida de 22. La impulsión recibida por la palanca 1 queda amortiguada en la cámara de aire 26.

De aquí resulta que mientras la variación de tensión sea superior a un cierto valor (que siempre es posible limitar de antemano regulando convenientemente la distancia entre 24 y 25) el inducido 19 gira con movimiento continuo y con su máxima velocidad; pero en cuanto la variación de tensión queda reducida al límite señalado, el inducido 19 anda a saltos y su velocidad

media es tanto menor cuanto menor es la variación que queda por corregir, pues mientras que las impulsiones sucesivas comunicadas a la palanca 1 para alejar 9 de 10 van creciendo a cada instante, el par que tiende, después de cada ruptura, a acercar 9 hacia 10, va, al contrario, disminuyendo cada vez más.

Para poder regular en cada aplicación particular el par ejercido por 25 sobre 24, este electroimán está montado de modo que se pueda hacer variar la distancia de 24 a 25.

Para reducir la chispa de ruptura se aprovecha la siguiente observación: cuando la armadura 16 ha bajado, el entrehierro es prácticamente nulo, por lo cual se puede disminuir considerablemente la corriente que circula por 11 sin temor a que pueda levantarse 17 por efecto del muelle de llamada 21. Para obtener automáticamente esta reducción de corriente, se hace el devanado de 24 de modo que la resistencia de este circuito sea muy pequeña en comparación con la resistencia de la parte 12-23 del potenciómetro. En el momento en que 16 establece un cortocircuito entre 18 y 22, la parte del potenciómetro comprendida entre 12 y 23 se encuentra shuntada y la tensión entre 12 y 23 puede reducirse de este modo cuanto se quiera; se limita muy fácilmente el aumento de corriente que resulta en el potenciómetro dando a la parte que queda en servicio una resistencia mucho más grande que la de la parte shuntada.

La tensión entre 12 y 23 puede reducirse de esta manera a una fracción determinada de su valor inicial. Esta reducción de corriente no bastaría para asegurar la buena conservación del contacto, por lo cual es preciso, para evitar los arcos, que la corriente se establezca siempre de un modo franco y se corte bruscamente. Este doble resultado se logra mediante el

imán 8 y el muelle 10 (en realidad 8 es un pequeño electroimán).

La resistencia 28 sirve para limitar la corriente en 9, en el momento de los arranques.

En el caso de que se trate de corregir un aumento de tensión, el funcionamiento se explica de un modo análogo substituyendo los números anteriores por los 9', 10', 11', 16', 17', 18', 21', 22', que correspoden a los órganos que desempeñan el mismo papel que los correspondientes a los números antes citados. Basta tener en cuenta que el contacto entre 18' y 16' tiene por efecto hacer girar 19 en un sentido que produce la disminución de la excitación.

Una variación del 1 °/₀ produce, en menos de un segundo, el movimiento necesario para restablecer la tensión.

Los contactos sólo han de romper una corriente de 0,03 de ampere bajo una diferencia de potencial de 3 volts; en estas condiciones se pueden obtener varios millones de rupturas sin ningún fallo y sin que sea necesario cambiar las piezas de contacto.

Compoundado de los alternadores.—Para contrarrestar las variaciones de tensión debidas a las variaciones bruscas de las corrientes, se procura realizar un compoundado práctico de los alternadores. Las instalaciones que tienen alternadores compound son todavía poco numerosas.

Los sistemas de compoundado que obran directamente sobre la excitatriz son los siguientes:

1.° La excitatriz es una dinamo con devanados sinusoidales. El estator, análogo a un estator de motor de campo giratorio, es alimentado por los secundarios de transformadores, cuyos primarios están derivados en serie en la corriente principal del alterna-

dor (fig. 64). El rotor es un inducido de dinamo de corriente continua sobre el cual hay dos devanados sinusoidales defasados en un ángulo tal que las fuerzas electromotrices inducidas resultan defasadas en 90°.

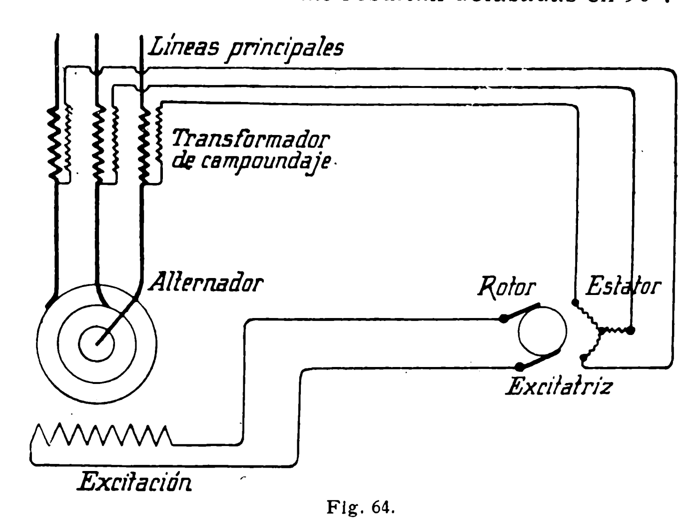


Fig. 64.

2.° Si la excitatriz lleva tres anillas que, de igual modo que las de una conmutatriz, están unidas a tres puntos del devanado inducido, y defasadas en 120° (fig. 65); las escobillas que se apoyan sobre estas anillas están unidas a los secundarios del transformador de compoundado. Cuando el alternador produce corriente, hay entre las anillas una tensión cuyo valor eficaz es de $\frac{U\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}$ [1], siendo U la tensión continua. Si la corriente producida por el alternador aumenta, la tensión alterna entre las anillas crece también, y al mismo tiempo la tensión continua, por lo cual aumenta la corriente de excitación del alternador.

[1] Tomo III, pag. 279.

La regulación de este compoundado se hace mediante el reostato que actúa sobre la tensión de la excitatriz, y de una vez para siempre: 1.° por el número de espiras del transformador de compoundado

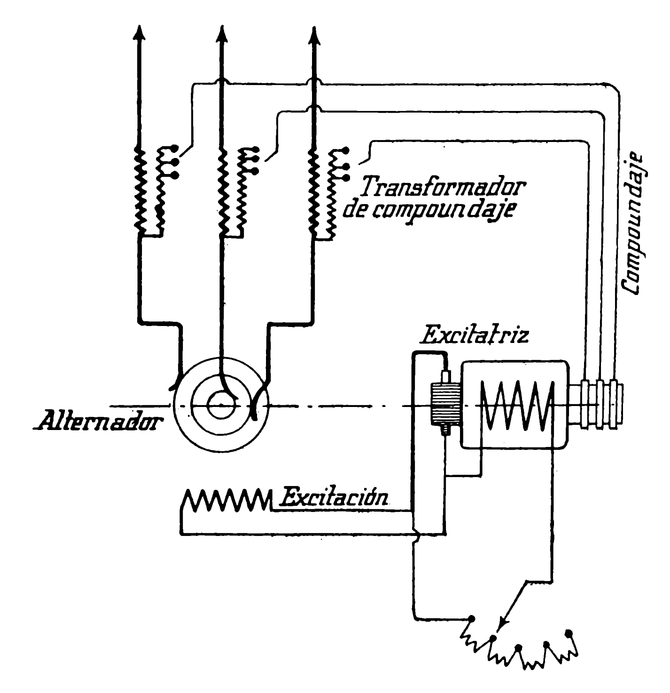


Fig. 65.

y 2.° por la posición mecánica del rotor de la excitatriz respecto a la del alternador. En efecto, para que en el interior de la excitatriz cuyo eje del campo es fijo, se superpongan al flujo inicial los flujos inducidos por las corrientes en el primario del transformador, es preciso que, en el momento en que los valores instantáneos de la tensión son máximos, las espiras de la fase conveniente estén bajo el eje de los polos; por consiguiente, hay un desvío del árbol correspondiente; para

establecer este desvío se dispone sobre el acoplamiento rígido de la excitatriz con el alternador un sistema análogo al de las magnetos de los motores de explosión. El número de polos de la excitatriz es el mismo que para el alternador.

Instalación de un alternador de baja tensión

El acoplamiento de un alternador con su máquina de arrastre se hace, en general, con más facilidad que el de una máquina de corriente continua, por ser casi siempre el rotor inductor, y por consiguiente más sólido y fuerte que un inducido con colector. Cuando el estator es de dos piezas, hay que hacer convenientemente las conexiones de los carretes o barras de cada parte del devanado. Según la disposición de devanado que se adopte, la ejecución de estas conexiones se reduce a varias soldaduras entre los carretes, o necesita la colocación de carretes enteros que abracen un anillo de cada parte. Este segundo caso se presenta con frecuencia en los devanados de tres planos, siendo preciso entonces, después de haber unido el devanado, introducir el inductor lateralmente, en el sentido del eje de rotación.

Las dos partes de las láminas deben apoyarse una sobre otra por superficies bien limpias, para reducir al mínimo el entrehierro, interponiendo además entre ambas una hoja de papel fino.

La máquina de arrastre se calcula de modo que se obtenga una velocidad angular correspondiente a una frecuencia industrial; las frecuencias más usuales son las de 25, 42 y 50 periodos por segundo.

Conductores. — El cuadro se une al alternador mediante un conductor flexible aislado, o por medio

de barras de cobre desnudo. La disposición preferente es la de la instalación de los conductores en alcantarillas; la línea de excitación, que comprende en su circuito el reostato de excitación, un interruptor de ruptura lenta y un amperímetro, está constituída en general por conductores semiflexibles, de mediano aislamiento, por pasar raramente las tensiones de excitación de los 110 volts. Para las pequeñas excitatrices, los conductores pueden disponerse en tubos, que van en la misma alcantarilla que la línea del alternador.

La red de la corriente principal se coloca sobre aisladores, consistentes en poleas más o menos próximas según el peso del conductor, y en aisladores de pinza para las barras de cobre. Los aisladores van fijados sobre barras empotradas en las paredes de la alcantarilla (fig. 6). Si el conductor es muy pesado, se le apoya, en el sentido de su longitud, sobre planchas secas. Las alcantarillas forradas con una placa metálica deben ser bastante hondas para que la proximidad inmediata de los conductores no desarrolle corrientes parásitas en la placa.

En las redes de gran intensidad hay que tomar algunas precauciones: los aisladores deben ser bastante numerosos para reaccionar contra todo esfuerzo mecánico debido a los pares electrodinámicos que puedan desarrollarse en caso de cortocircuito en la línea. Los soportes de los aisladores, si son de metal magnético, deben estar bastante separados de la barra que soportan, y nunca deben rodearla, porque la espira que así se formaría, por estar en cortocircuito, se calentaría y daría lugar a una caída de tensión.

Las pinzas de los aisladores que sostienen las barras (fig. 7) se hacen, por la razón que acabamos de exponer, de metales todo lo no magnéticos que sea posible.

Para reducir al mínimo la caída de tensión induc-

tiva en los conductores de gran sección, es conveniente que los conductores de las diferentes fases estén todo lo cerca que permita el aislamiento. Por otra parte, conviene también disponer sus ejes en triángulo equilátero para la corriente trifásica, en cuadrado para la bifásica, teniendo cada fase sus conductores sobre la misma diagonal. De este modo se produce una composición de los campos creados alrededor de los conductores, que reduce al mínimo las caídas de tensión debidas a la autoinducción. En caso de corrientes muy intensas, se divide un conductor en un cierto número de barras, que se unen entre sí por cada extremo, y que quedan dispuestas como indica la figura 66.

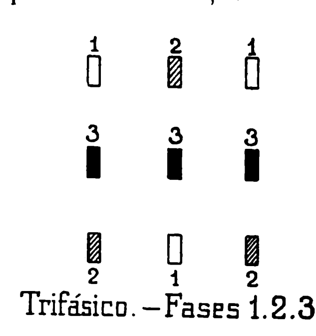
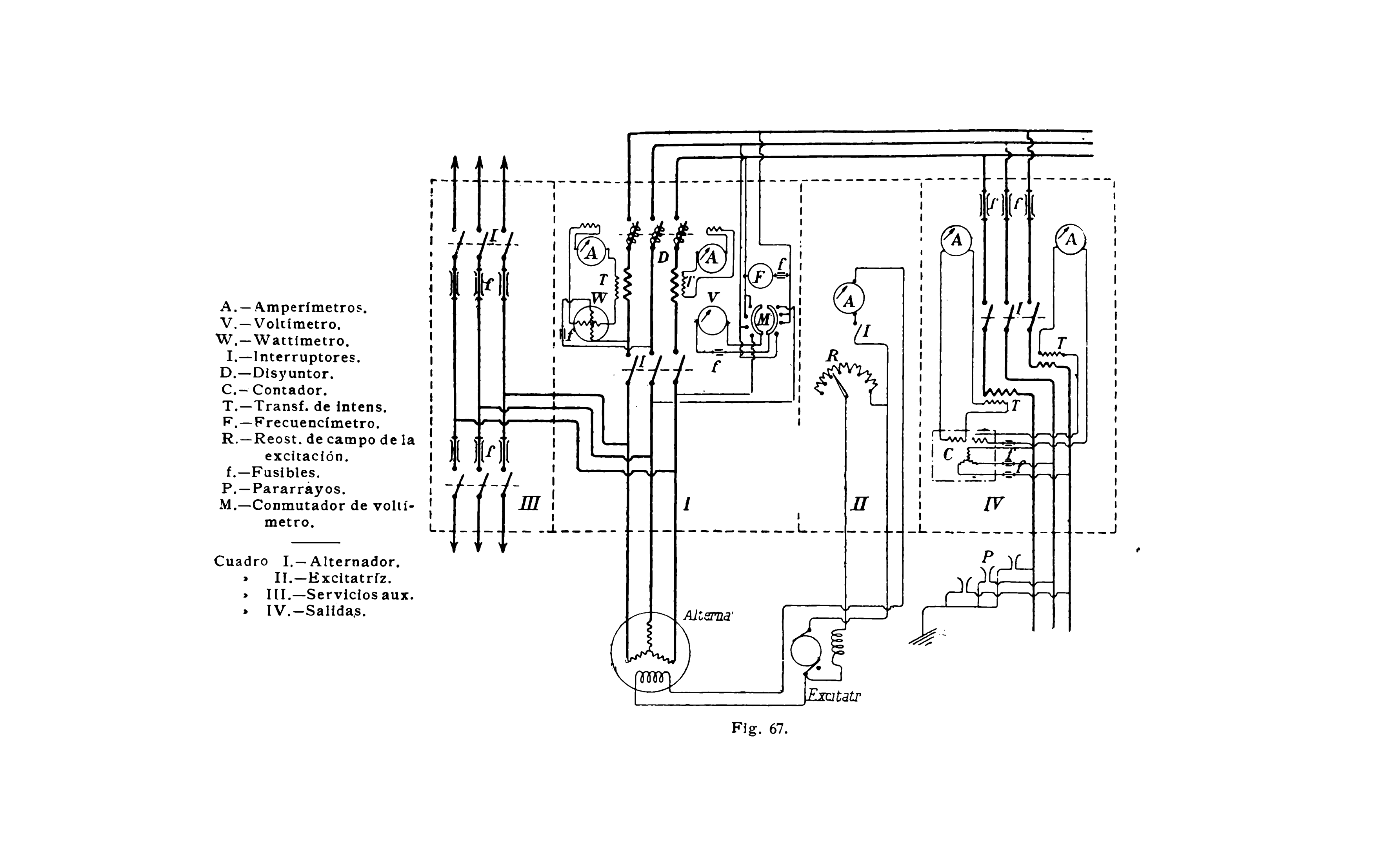


Fig. 66.

Cuadro.—El cuadro de distribución, para un alternador de baja tensión tiene como mínimo: un interruptor, bi, tri o tetrapolar, según la corriente producida y su dispositivo de escape; un amperímetro sobre una fase, si la carga está equilibrada, o uno sobre cada fase en caso contrario; un voltímetro que pueda derivarse entre cada fase, y finalmente, un wattímetro. Además, y aparte el dispositivo regulador del voltaje para la excitación, va en el cuadro un amperímetro de excitación, y, si es necesario, un fasímetro (fig. 67).

Los interruptores de escape automático están casi siempre accionados por relevadores. El interruptor de excitación no debe ser nunca de ruptura brusca.

Para no tener muchas conexiones de grandes secciones, los aparatos de intensidad (amperímetros,


A.—Amperímetros.
V.—Voltímetro.
W.—Wattímetro.
I.—Interruptores.
D.—Disyuntor.
C.—Contador.
T.—Transf. de intens.
F.—Frecuencímetro.
R.—Reost. de campo de la excitación.
f.—Fusibles.
P.—Pararrayos.
M.—Conmutador de voltímetro.
Cuadro I.—Alternador.
» II.—Excitatríz.
» III.—Servicios aux.
» IV.—Salidas.
I
II
III
IV
Alterna'
Excitatr
Fig. 67.

relevadores de máxima, wattímetros) están alimentados por transformadores. Los secundarios de estos se calculan, en general, para 5 amperes como máximo, con lo cual se pueden hacer las conexiones en hilo de $^{16}/_{10}$, cuyo manejo es muy cómodo. Los transformadores de intensidad (fig. 68) se intercalan a la llegada al cuadro en un punto cualquiera de los conductores.

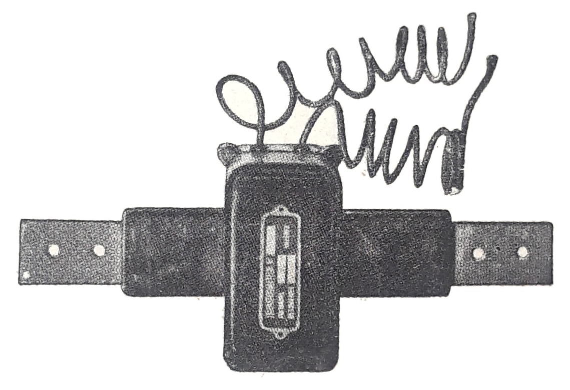


Fig. 68.

Se pueden colocar en serie sobre un solo transformador de intensidad varios aparatos, por ejemplo, el amperímetro, el circuito de intensidad del wattímetro y el relevador, correspondientes todos a una misma fase. Cuando un transformador de intensidad se inutiliza, su devanado secundario debe ponerse en cortocircuito. Todas las conexiones de hilo fino entre aparatos se fijan por detrás del cuadro, sobre el mármol, estando cada hilo aislado y separado de su inmediato. Nunca deben colocarse varios hilos en la misma vaina.

Cada voltímetro, lámpara o circuito de tensión va protegido por un pequeño fusible. Cada toma de derivación sobre un hilo debe quedar a la vista, para poder revisarla siempre que sea conveniente. La

unión entre transformadores de intensidad y aparatos se hace bajo tubos si el transformador está fuera del cuadro. Cuando un hilo fino parte de una barra conductora, se fija a la misma mediante un perno pequeño, mucho mejor que con soldadura, para poder hacer cuantas revisiones y comprobaciones sean necesarias.

Cuando se agrega una resistencia adicional a un circuito voltimétrico, debe colocarse preferentemente sobre la parte del circuito más distante del punto neutro, de modo que baje respecto a la tierra el potencial del aparato protegido, tal como dijimos para los aparatos de corriente continua (pág. 16).

Los aparatos electrodinamométricos no deben estar nunca cerca de barras recorridas por corrientes intensas, porque sus indicaciones quedarían alteradas.

La medida de la tensión sobre las tres fases se hace ordinariamente con un solo voltímetro y un aparato bipolar de varias direcciones.

Los cuadros de arranque llevan una protección (interruptores automáticos o fusibles) y un interruptor de tres hojas o cuchillos, dos transformadores de intensidad para alimentar a dos amperímetros, y un contador cuyo circuito de tensión está protegido por fusibles. Si hay peligro de sobretensiones en la línea, se colocan pararrayos (véase pág. 95).

La frecuencia se comprueba con un frecuencímetro, o a falta de este instrumento, con un taxímetro colocado sobre la máquina.

Alternadores A_1, A_2, A_3 que funcionan en paralelo (figura 70).—Además de los instrumentos que hemos dicho para cada aparato, se colocan lámparas de fase o un indicador de fase-sincronismo ([1]). La ope-

([1]) Tomo IV, INSTALACIONES INTERIORES, pág. 314.

ración del acoplamiento se hace como ya se dijo en el tomo I, *Generalidades,* página 402. Para el primer acoplamiento no se deberá emplear una sola lámpara por fase, pues sólo se aseguraría el sincronismo para esta fase. El sincronismo se comprueba con tres lámparas, y después podrá bastar con una sola. R_1, R_2 y R_3 son los reostatos de regulación y R el de campo de las excitatrices.

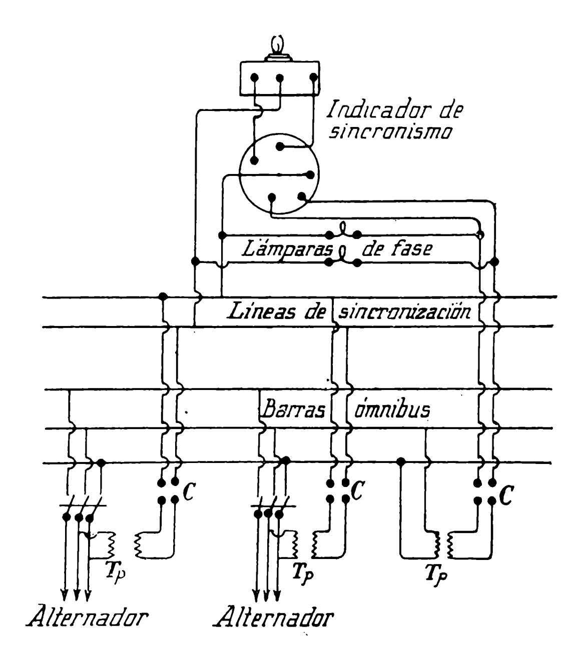


Fig. 69.

Para hacer que los alternadores lleguen al sincronismo, se acciona el regulador de la máquina de arrastre. Para este efecto se hace a veces, tratándose de grandes máquinas, una maniobra a distancia, mediante un pequeño motor con inversión de marcha, cuyo

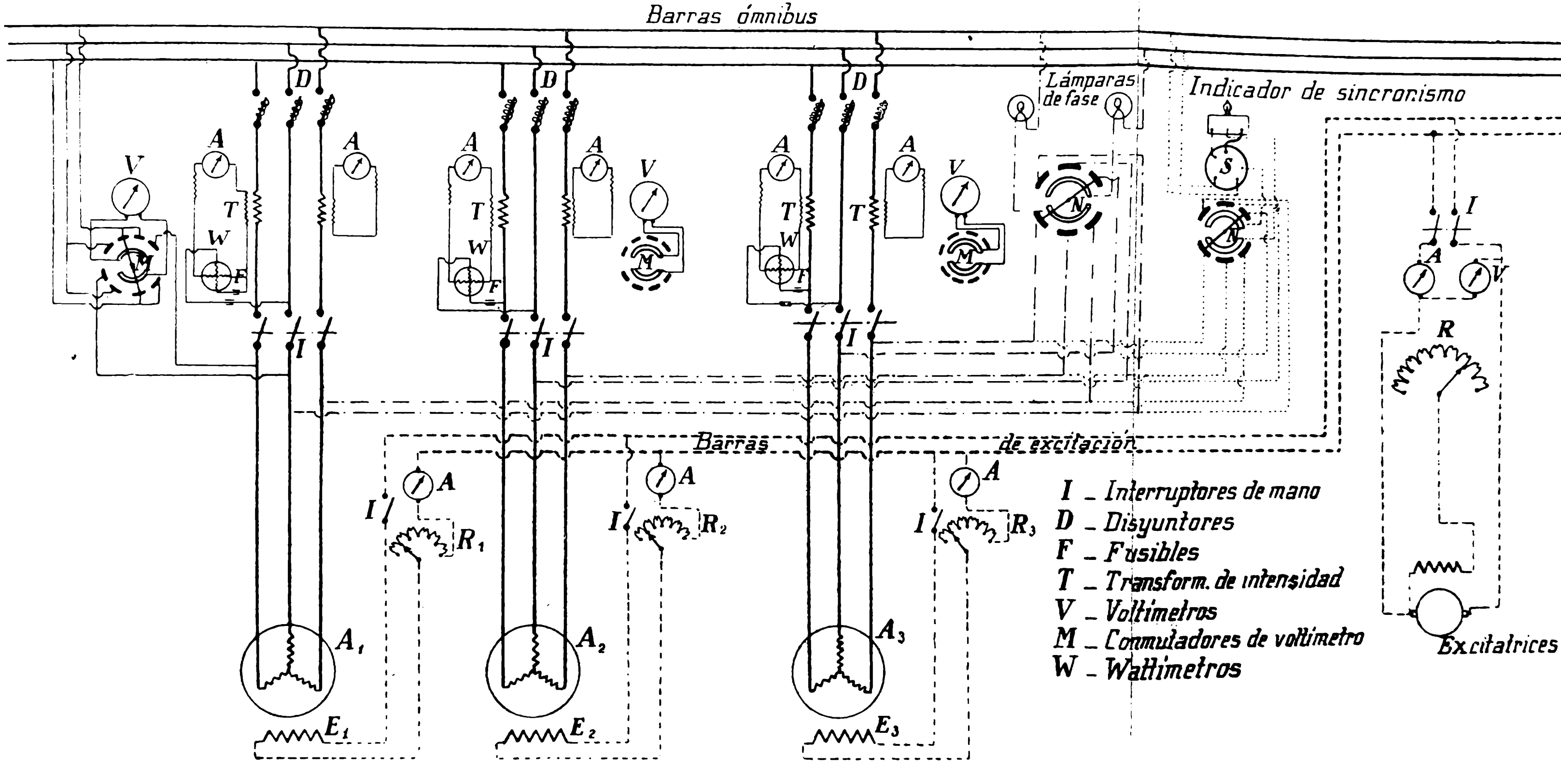

Barras ómnibus
Lámparas de fase
Indicador de sincronismo
Barras de excitación
I - Interruptores de mano
D - Disyuntores
F - Fusibles
T - Transform. de intensidad
V - Voltímetros
M - Conmutadores de voltímetro
W - Wattímetros
Excitatrices

Fig. 70.

movimiento se dirige desde el cuadro con un conmutador inversor. Este motor hace presión sobre los muelles de la *balanza* del regulador de la máquina motriz. Se pueden substituir los conmutadores *N*, *N'* empleados en el montaje de la figura 70 por líneas de sincronismo y clavijas de sincronización *C*. En este caso, el montaje es el indicado en la figura 69; T_p son transformadores de potencial.

Instalación de un alternador de alta tensión

Los reglamentos sobre centrales y redes limitan ordinariamente la baja tensión (categoría A de las instalaciones) a 150 volts eficaces entre conductores y tierra; por consiguiente, se podría decir que casi todos los alternadores son de alta tensión; pero en realidad se llaman así a aquellos cuya tensión está comprendida entre 500 y 12000 volts. Por encima de 12000 volts, es muy raro que el alternador comunique directamente la corriente a la red, empleándose transformadores elevadores.

El montaje del alternador debe hacerse con todo cuidado; las distintas conexiones que hay que hacer en los devanados deben aislarse perfectamente y en caso necesario disponerse a distancia de las piezas metálicas próximas, mediante tacos o cuñas aislantes. Los bornes deben colocarse muy espaciosamente para permitir una disposición conveniente de los conductores de salida.

Red de alta tensión.—La línea que une el generador con el cuadro consiste en un cable o conductor semiflexible ligeramente aislado o desnudo y apoyado sobre aisladores, o bien en un cable armado formado de varios conductores y apoyado directamente en el suelo. El trayecto de la línea es generalmente subterrá-

neo y se hace utilizando las galerías del alcantarillado o mediante alcantarillas especiales. La línea formada por hilos o cables sobre aisladores tiene sobre el cable armado la ventaja de ser más económica, pero únicamente debe utilizarse en lugares secos, y sólo debe pasar por sitios en que no pueda resultar peligrosa.

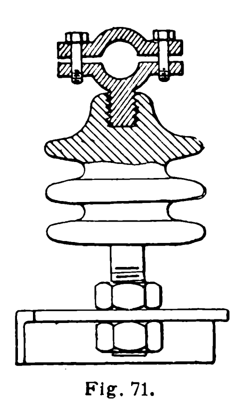


Fig. 71.

Respecto a este punto hay que tener en cuenta las siguientes prescripciones legales: todo paso junto a una línea eléctrica al descubierto, debe estar completamente libre en una anchura de un metro cuando menos, y en una altura de dos metros como mínimo, aparte de las otras precauciones.

Los conductores van tendidos sobre aisladores con bornes (figura 71); estos aisladores están fijados sobre hierros de ángulo empotrados en la pared. La dimensión de los aisladores ha de ser tal que puedan soportar la tensión triple de la normal. Los hilos se tienden de tal modo que por el balanceo natural o el alargamiento que puedan sufrir (dilatación), no baje de 15 a 20 centímetros la distancia entre conduc-

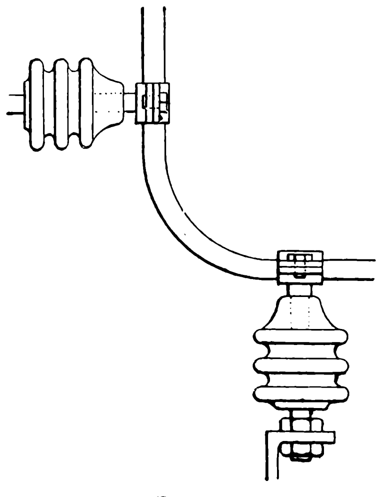
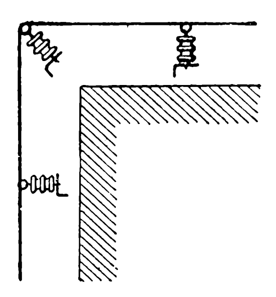


Fig. 72.

tores o entre conductores y masa (teniendo en cuenta que la máxima tensión es de 12000 volts).

Si la línea forma un ángulo entrante o una curva cóncava, el hilo ha de quedar poco tenso para que los aisladores no sufran una tracción perjudicial por parte del mismo (fig. 72).


Fig. 73.

En cambio, si forma la línea una curva o ángulo convexos, no hay inconveniente en colocar un aislador en el vértice mismo del ángulo (fig. 73).

El número de aisladores se determina según el peso del conductor, su mayor o menor rigidez, y según el trazado de la línea. En línea recta se puede tomar como término medio un aislador por metro.

La red formada por cable armado es de una instalación sencillísima. El cable se tiende, tirando de un extremo, y después se fija con grapas de hierro de

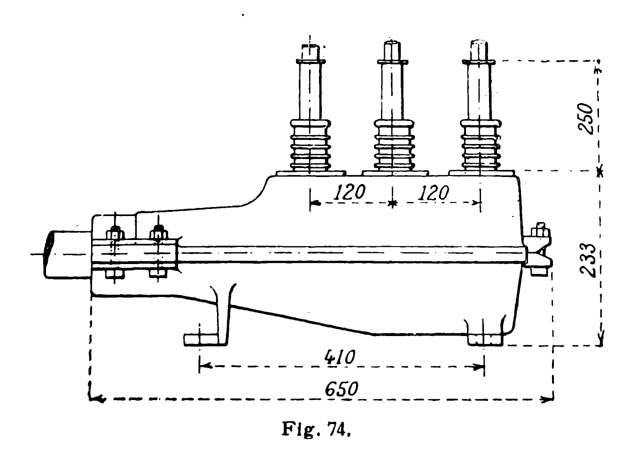


Fig. 74.

trecho en trecho; las curvas no deben tener un radio menor de *veinte veces el radio del cable.*

El cable armado normal, aislado con papel impregnado y untado con betún, no debe nunca manejarse a una temperatura inferior a + 10°, porque a temperaturas menores se corre el peligro de romper la cubierta aislante.

Los extremos del cable armado se conectan por intermedio de manguitos terminales que pueden ser de distintas formas (figs. 74 y 75). Los conductores se desnudan y se unen a los bornes dispuestos en el manguito; la masa de este manguito está unida eléctricamente por un hilo soldado, a la armadura laminar del cable. El manguito, después de cerrado, se llena con brea caliente colada en varias veces, para tener la seguridad de haberlo llenado bien, sin dejar burbujas de aire dentro.

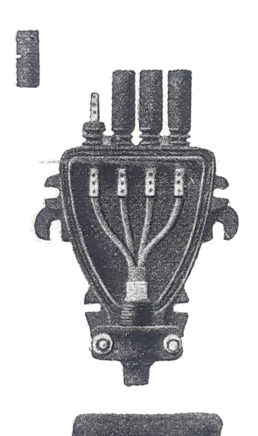




Fig. 75.

La densidad de la corriente que se puede admitir en los cables armados con varios conductores varía de 8 amperes por milímetro cuadrado para las pequeñas secciones (de 5 mm. cuadrados), hasta 1,5 amperes por milímetro cuadrado para las grandes secciones (de 200 mm. cuadrados).

Cuando se quiere tocar un cable armado que tenga alguna longitud, inmediatamente después de puesto fuera de circuito, hay que unirlo a tierra mediante un conductor sujeto a distancia, porque de no hacerlo así,

la capacidad del cable daría lugar, con la descarga estática, a una sacudida muy desagradable.

Cuadro.—El cuadro de una instalación de alta tensión está formado de dos partes distintas: una que comprende los aparatos de comprobación y manio-

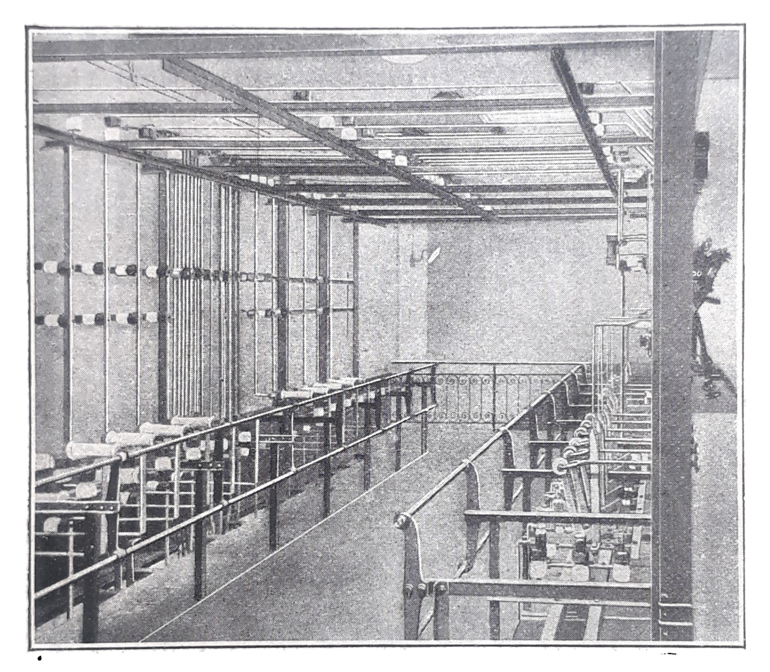


Fig. 76.

bra, y la otra las barras ómnibus de alta tensión, los interruptores de aceite, los transformadores de medida, etc.

El circuito de tensión peligrosa no debe tener ningún contacto directo con el cuadro de maniobra. Las prescripciones legales preveen, para el caso en que el cuadro tenga aparatos de contacto directo, la coloca-

ción de una tarima de servicio, aislada eléctricamente y que ofrezca todas las garantías de seguridad para las maniobras.

Hay dos clases de cuadros ordinariamente en uso: el primero, que está formado por paneles verticales de mármol, sirve para la maniobra a distancia de los interruptores directamente y a nivel. Está constituído por un bastidor o chassis doble que por una parte lleva los paneles y aparatos *BT* (baja tensión), y por otra los conductores *AT* (alta tensión) (fig. 76). Las dos partes

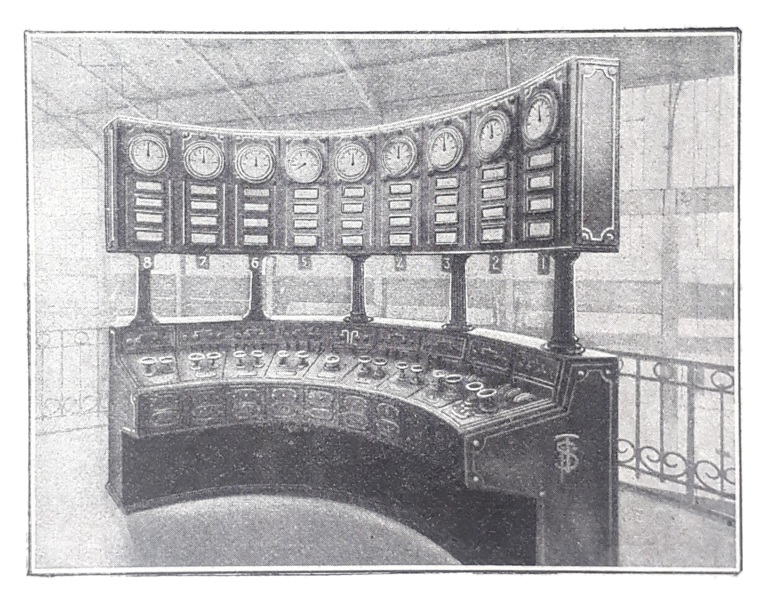


Fig. 77.

están separadas por un pasillo central cuyas dimensiones mínimas son un metro de anchura y dos metros de altura.

La segunda clase de cuadros consiste en pupitres o mesas de maniobra que llevan los aparatos *BT* y

de maniobra y generalmente por debajo los circuitos *AT* (fig. 77). Este segundo sistema se emplea también cuando la alta y baja tensión ocupan pisos distintos.

Se pueden agrupar útilmente las dos clases de cuadros; los paneles verticales destinados a las maniobras accesorias y de tensión reducida, y los pupitres reservados a la maniobra de los alternadores únicamente.

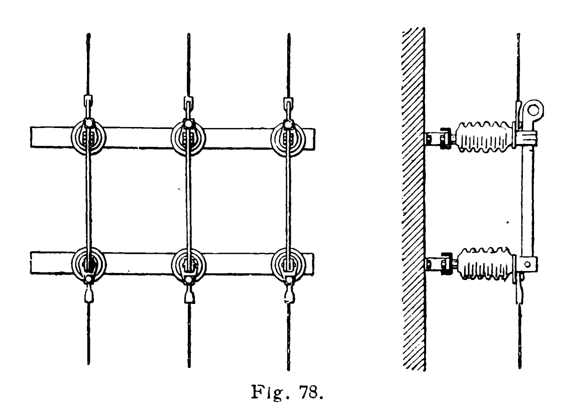


Fig. 78.

El número y clase de aparatos de comprobación son los mismos que para un alternador de baja tensión.

Cada interruptor *A1* está, pudiera decirse, duplicado por un juego de ruptores (fig. 78) que se manejan bajo tensión, *en circuito abierto,* por medio de una pértiga aisladora *B* cuya parte inferior *T* comunica con tierra mediante un cable flexible *C* de gran sección (fig. 79).

La maniobra a distancia de los interruptores se obtiene mecánicamente por medio de varillas y *retrocesos* articulados; un sistema de trinquetes permite que los interruptores escapen automáticamente, pero sin que los órganos de maniobra estén sometidos al movimiento de éstos.

Esta maniobra se hace a veces eléctricamente, sobre todo para las tensiones muy elevadas. En este caso hay un generador de corriente continua que alimenta unos electroimanes dispuestos cerca de los interruptores y cuya acción produce el movimiento de maniobra; tanto el escape como el cierre se hace con un conmutador. En algunos tipos de aparatos, las maniobras las verifica un pequeño motor (fig. 85).

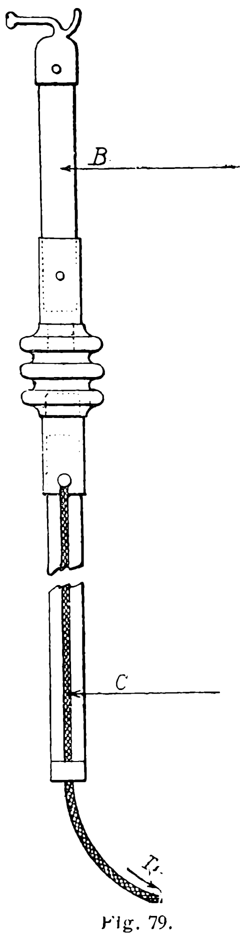


Fig. 79.

Las cubas de aceite están provistas de un dispositivo mediante el cual se pueden desmontar rápidamente, de modo que se faciliten las revisiones de las tomas y piezas de contacto.

Todos los interruptores maniobrados a distancia de este modo tienen un sistema de contacto que hace arder lámparas indicadoras, de colores diferentes según que el interruptor esté abierto o cerrado.

Los interruptores deben tener una cerradura de una sola llave, que debe estar en poder de todo el que tenga que trabajar en el circuito de este interruptor.

Todas las piezas metálicas que forman masa, chassis, hierros de soporte de los aisladores, los demás hierros, etc., están unidas entre sí mediante un conductor de gran sección (ordinariamente basta con un hilo de cobre de 5 milímetros).

Los transformadores de potencial están protegidos sobre cada fase con fusibles de alta tensión; los transformadores de intensidad no deben tener su secundario en circuito abierto, pues de ser así harían de carretes de autoinducción y los secundarios estarían sometidos a una tensión excesiva.

Panel de salida o arranque.—Los aparatos para un panel de salida son: un interruptor de aceite maniobrado a distancia y de escape automático a máximo de corriente, un juego de ruptores, un amperímetro, un voltímetro, un wattímetro y un contador.

Las barras ómnibus se unen, en primer lugar, con los ruptores; la posición abierta de estos ruptores debe

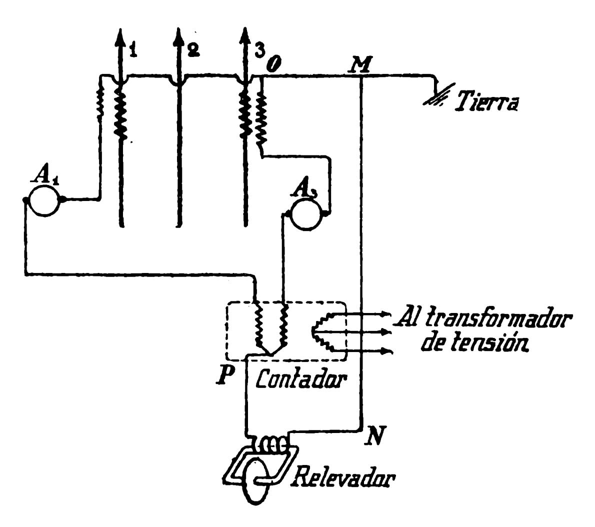
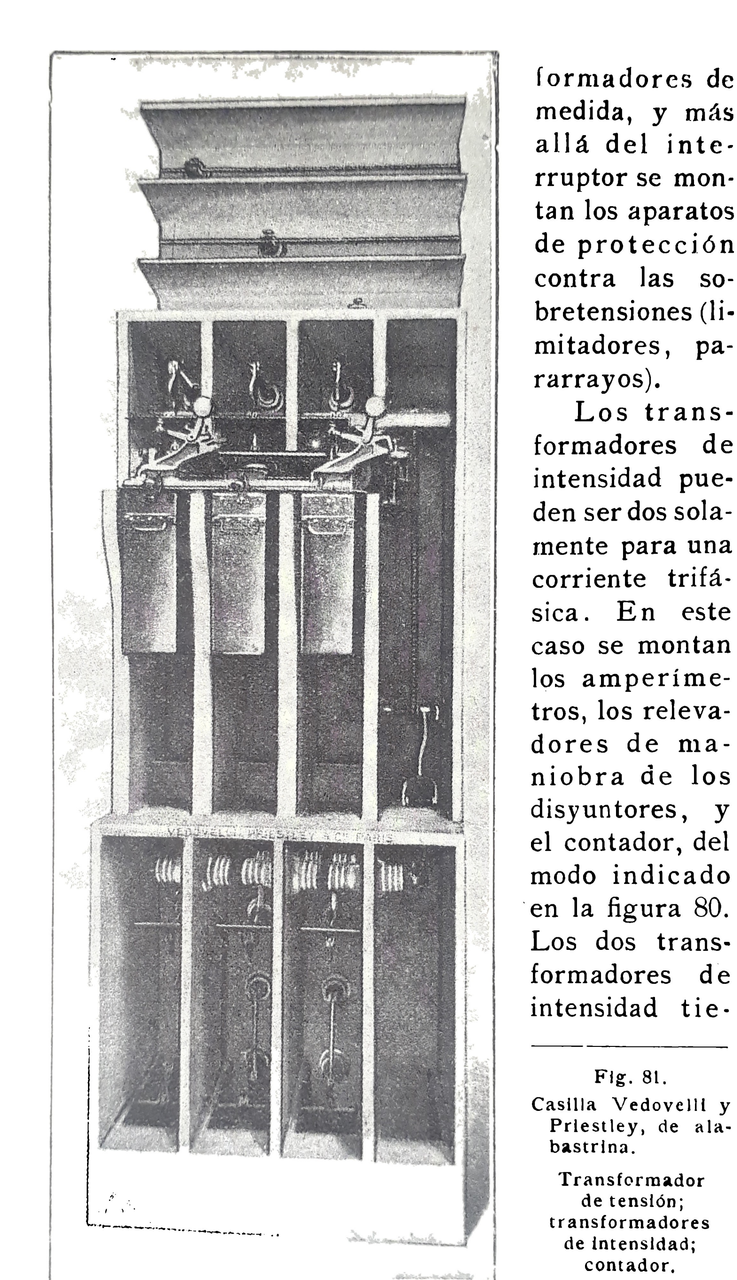


Fig. 80.

permitir la puesta a tierra de la línea de salida, para lo cual se hace que descansen los cuchillos sobre la armazón de hierro en la posición de máxima abertura. Entre ruptores e interruptores se intercalan los trans-



formadores de medida, y más allá del interruptor se montan los aparatos de protección contra las sobretensiones (limitadores, pararrayos).

Los transformadores de intensidad pueden ser dos solamente para una corriente trifásica. En este caso se montan los amperímetros, los relevadores de maniobra de los disyuntores, y el contador, del modo indicado en la figura 80. Los dos transformadores de intensidad tie-

Fig. 81.
Casilla Vedovelli y Priestley, de alabastrina.

Transformador de tensión; transformadores de intensidad; contador.

nen un punto común unido a tierra; la corriente de cada uno de estos dos secundarios recorre los aparatos amperimétricos de la fase correspondiente, después se vuelven a unir los dos circuitos y la corriente resultante atraviesa el relevador. El circuito se cierra a la salida del relevador sobre el punto común puesto a tierra. Téngase en cuenta que el sentido de la corriente en los dos transformadores no es indiferente, por

Fig. 82.

Casilla Vedovelli y y Priestley, de alabastrina.

Disyuntor tripolar. Ruptores.

haber una componente de las dos corrientes a 120°; la sensibilidad del relevador da a entender si las conexiones se han hecho en sentido conveniente.

Casillas.—Cuando la instalación de una central de alta

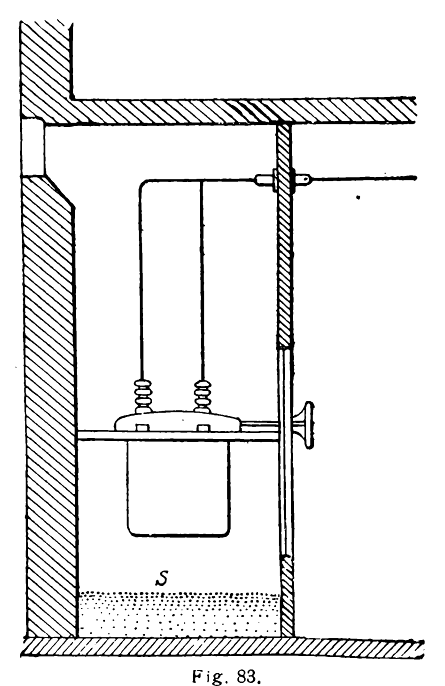


Fig. 83.

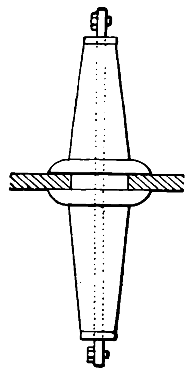


Fig. 84.

tensión tiene cierta importancia, se preparan casillas para todos los circuitos de *AT*, como se ve en las figuras 81 y 82, que representan dos casillas de Vedovelli y Priestley, hechas de alabastrina.

Cada máquina, cada llegada o salida tiene su casilla propia. Las paredes de estas casillas son de materias incombustibles, como ladrillos, fibro-cemento o materiales análogos. En estas casillas hay dispuestos hierros laminados para soportar los aisladores y aparatos *AT* (interruptores, transformadores de medida, etc, etc). Todos estos hierros están unidos a tierra; para los hierros que sostienen los interruptores

de aceite, hay que dejar por debajo sitio suficiente para bajar la cuba de aceite con objeto de poder revisar los contactos. Por debajo de los interruptores de aceite es prudente echar sobre el suelo una capa *S* bastante alta de arena (fig. 83), pues en caso de incendio o de explosión de la cuba de aceite, la arena absorbe el aceite inflamado impidiendo que el incendio se propague.

Las conexiones que tienen que pasar por el techo o las paredes de la casilla se hacen a través de agujeros

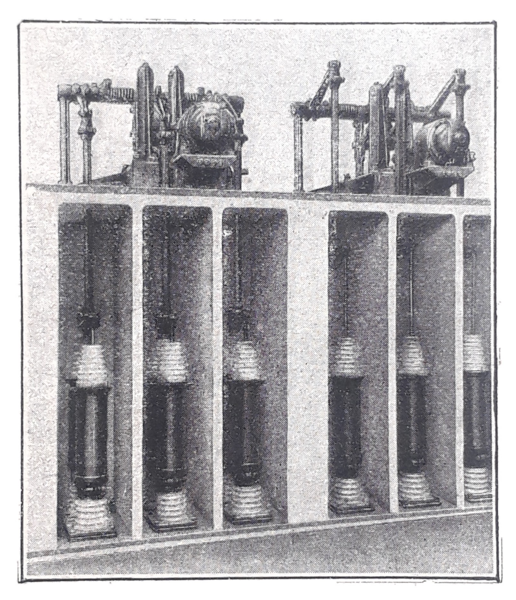


Fig. 85.

bien espaciados, dejando alrededor del conductor una distancia explosiva suficiente, o mejor aún, sujetando los dos terminales (exterior e interior) del conductor en aisladores especiales colocados a una y otra parte del techo o pared, perforados en toda su longitud y atravesados por un hilo conductor, es decir, empleando una

especie de tubo aislante que cierra perfectamente el agujero de la pared o techo de la casilla (fig. 84).

En la figura 85 se ven los interruptores de aceite para 50000 volts de la Compañía Thomson-Houston, en los cuales las tres fases están separadas entre sí por tabiques de ladrillo; estos interruptores van maniobrados por un motor de corriente continua.

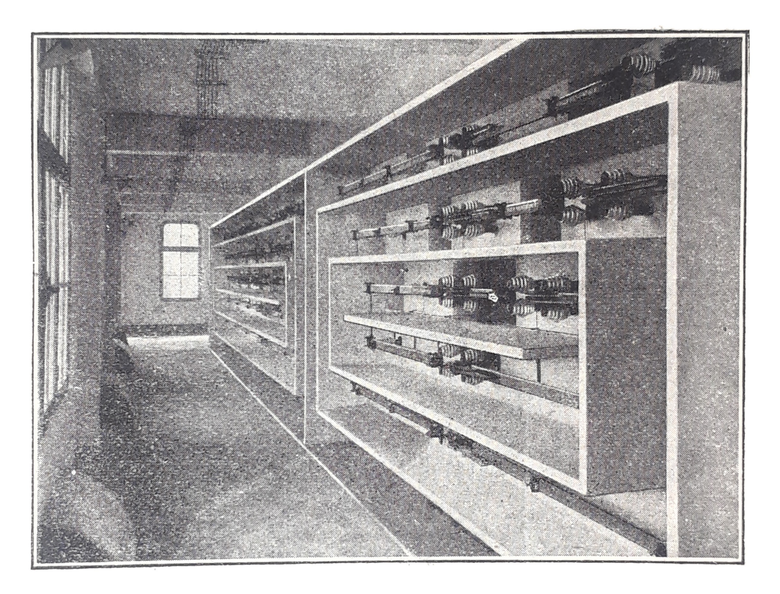


Fig. 86.

En la figura 86 se ve el montaje de líneas de alta tensión, separadas también por tabiques.

Protección de las máquinas contra los saltos de corriente y contra las sobretensiones debidas al circuito de consumo

En una red pueden ocurrir diversos accidentes que se traducen en un aumento brusco y de corta duración

de la corriente, es decir, en una corriente excesiva casi instantánea. La escasa duración de estos cortocircuitos no interesa a los aparatos automáticos de escape de los interruptores, que en general requieren cierta duración; pero su violencia es bien peligrosa para los carretes del alternador que, por reacción, quedan sometidos a esfuerzos mecánicos considerables. Este efecto se contrarresta con los *carretes de choque*.

Por otra parte, la caída de rayos sobre las líneas aéreas, las cargas acumuladas por los cambios atmosféricos (sobre todo para las líneas de cambio repentino de altitud, como sucede en los tendidos sobre montañas), y hasta la introducción en circuito de aparatos que modifican la curva de tensión [1], producen elevaciones de potencial peligrosas para el aislamiento de la instalación.

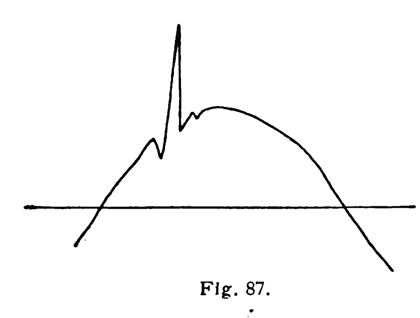


Fig. 87.

Estas perturbaciones en la línea dan lugar a trenes de ondas de frecuencia muy alta, cuya superposición a la tensión normal deforma la sinusoide inicial (fig. 87), pudiendo crear puntas muy peligrosas. Los circuitos de protección deben hacer de selectores, llevando a tierra las ondas peligrosas.

Las sobretensiones se combaten con los *pararrayos* y los *limitadores de tensión*.

Protección contra las sobreintensidades (intensidades excesivas). *Carretes de choque*.—Los carretes de choque son carretes de autoinducción sin hierro, cuya

(1) Tomo I, GENERALIDADES, cap. XX.

impedancia es pequeña para la frecuencia de la instalación, pero que toma un valor considerable para las altas frecuencias de las corrientes perturbadoras.

La corriente instantánea debida a una llamada brusca en la línea (cortocircuito, por ejemplo), queda de este modo reducida y deja de ser peligrosa. Los carretes de choque están generalmente constituídos por espiras arrolladas sobre un marco aislante, a razón de un carrete por cable de arranque en los bornes del alternador. El número de espiras es ordinariamente de 50 a 100, según la potencia y las características del alternador.

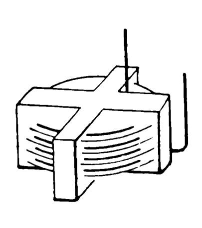


Fig. 88.

Se construyen carretes de choque con cemento; las barras arrolladas están empotradas, en varios puntos de su recorrido, en una columna de cemento de sección cruciforme (figura 88). Estos carretes son atravesados por la corriente emitida por el alternador, recorriendo cada fase un carrete, y están derivados entre los bornes del alternador y el interruptor correspondiente.

Cuando la instalación comprende transformadores elevadores de tensión, no es necesario emplear estos carretes, por ser el circuito *AT* del transformador quien sufre los choques; sin embargo, conviene emplear estos carretes cuando sobre la *BT* se hace el acoplamiento de varios alternadores, o cuando se deriva un circuito *BT*.

Desde este punto de vista, el transformador es de gran interés, por ser mucho menos delicado en su construcción que el alternador, y sus reparaciones son mucho menos costosas. Por consiguiente, es preferible producir una alta tensión por elevación mediante transformadores, que por emisión directa, aparte de

que esta última está limitada por construcción a 10000-15000 volts; es más, que resultaría económico instalar un transformador de relación $^1/_1$ para la alimentación de redes sometidas a frecuentes choques eléctricos, en atención al aumento de seguridad para el alternador.

Pararrayos y limitadores de tensión.—Se ha procurado la protección contra las sobretensiones de dos modos: el primero consiste en crear, cerrando un arco, un circuito de escape a la corriente de exceso, saltando el arco automáticamente entre dos puntas para una tensión límite determinada; el segundo procedimiento de protección consiste en crear un escape continuo y lento de las descargas eléctricas sobre la línea que pasen del régimen normal de ésta.

Pararrayos de cuernos.—Estos pararrayos se emplean siempre que se temen sobretensiones bruscas y

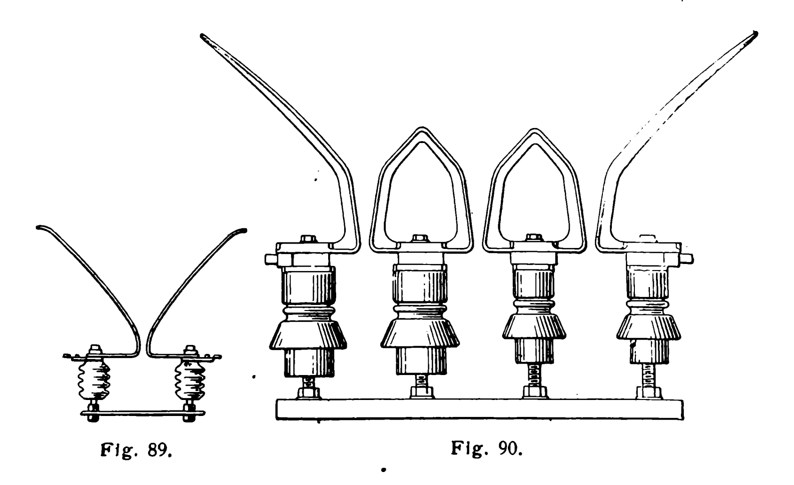


Fig. 89. Fig. 90.

de importancia (figs. 89 y 90). Se montan del modo siguiente (fig. 91): se intercala un carrete de autoin-

ducción sin hierro (figs. 92 y 93) en la línea, lo más

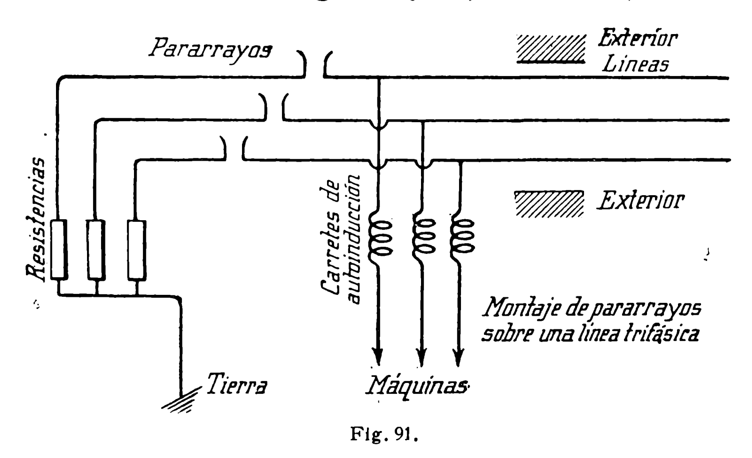


Fig. 91.

cerca que sea posible de la máquina que se quiere proteger; uno de los cuernos del pararrayos se une al

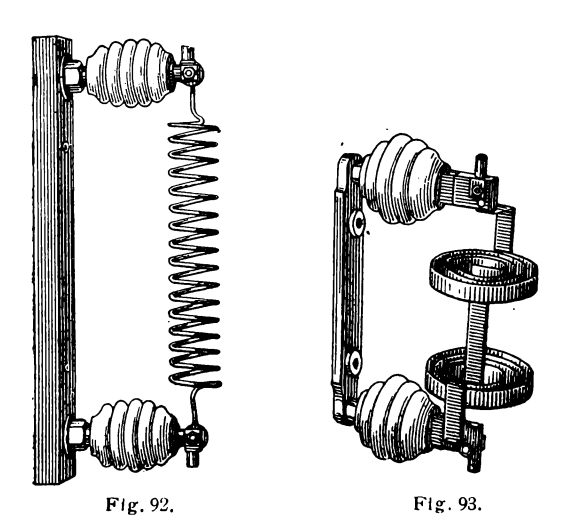


Fig. 92. Fig. 93.

borne de este carrete del lado de la línea, y el otro cuerno se pone a tierra a través de una elevada resis-

tencia *R*. Cuando una red trifásica tiene su punto neutro aislado de la tierra, las tres resistencias del pararrayos se unen en estrella y el centro de la estrella se une a tierra a través de una cuarta resistencia.

La distancia aproximada entre los cuernos del pararrayos es:

Milímetros . . .	22	34	62	95	130	165	200
Kilovolts	10	20	30	40	50	60	70.

El conductor que va al suelo debe tener la menor autoinducción posible. Una sección de 1 centímetro cuadrado parece muy suficiente (tira delgada de cobre). La toma de tierra debe ser muy buena: por ejemplo, una placa galvanizada o tubos que presenten 1 metro cuadrado de sección aproximadamente. La resistencia debe ser de unos 15 ohms.

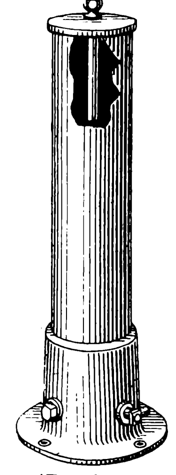


Fig. 94.

Una excelente toma de tierra la constituye una tira de metal introducida en el suelo a unos 30 centímetros de profundidad. A esta profundidad no hay que temer el desecamiento o el efecto de la helada, que aumenta la resistividad del suelo hasta el 1000 %.

Para una hoja de hierro galvanizado de 20 × 1 milímetros, las resistencias obtenidas por este dispositivo son del orden siguiente:

Longitud de la tira en m.	5	10	15	50	100	200	500
Resistencia en ohms. . .	37	21	14	5	3	1,5	0,6

La resistencia *R* puede estar formada por una caja cilíndrica de gres con fondo metálico, más o menos llena de agua: una varilla conductora atraviesa la tapa y establece contacto con el agua (fig. 94). El fondo se

pone a tierra y la varilla se une al cuerno del pararrayos. El agua está mezclada con un poco de glicerina, que además de regular la resistencia del líquido hace bajar el punto de congelación; con una ligera capa de aceite se evita la evaporación del agua; las resistencias constituídas por el agua y la glicerina varían con el tiempo, por lo cual conviene comprobarlas de vez en cuando.

También se forman resistencias con arena húmeda, que substituye al agua glicerinada, en recipientes

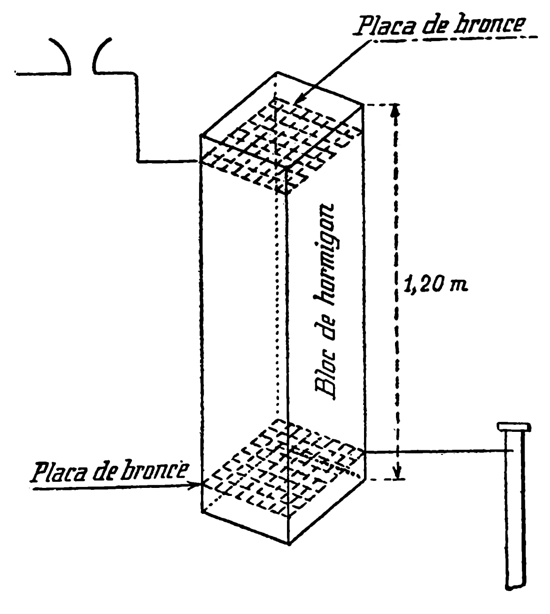


Fig. 95.

análogos. También se hacen estas resistencias con hormigón; en este caso, las tomas de corriente son dos rejillas de bronce situadas cerca de los extremos del bloque de hormigón (fig. 95).

La resistencia óhmica de estos diferentes dispositivos es de 2000 a 5000 ohms para voltajes de 10000 a 15000 volts. Para tensiones superiores, se pueden disponer varias resistencias en serie de modo que la corriente en el circuito del pararrayos no produzca ninguna perturbación en la línea (fig. 96), pues hay que tener en cuenta que en el momento de romperse el arco por alargamiento, el circuito queda bruscamente descargado de la corriente que pasa por el circuito de protección, pudiendo esto dar lugar a una nueva sobretensión tan peligrosa como la que produce la chispa. En general, la resistencia se mide para que en el momento en que el arco la pone en circuito la potencia derivada en el circuito de tierra sea muy pequeña respecto a la potencia de la instalación.

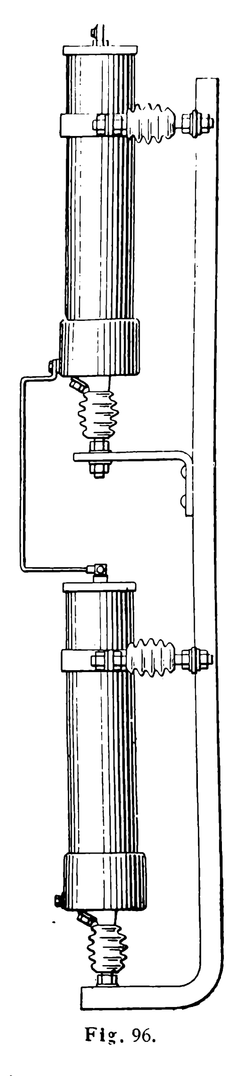


Fig. 96.

La separación de los cuernos del pararrayos debe ser bastante grande, y por lo tanto, este aparato no protege la instalación contra los efectos perjudiciales de sobretensiones relativamente pequeñas. Por esta causa ha habido necesidad de emplear pararrayos provistos de cuernos dispuestos en paralelo unos sobre otros y cuyas distancias van aumentando de abajo hacia arriba.

También se puede agregar al pararrayos de cuer-

nos, y en paralelo con el mismo, un limitador de rodillos regulado para una tensión menor que el pararrayos de cuernos. Más adelante describiremos estos limitadores (fig. 97).

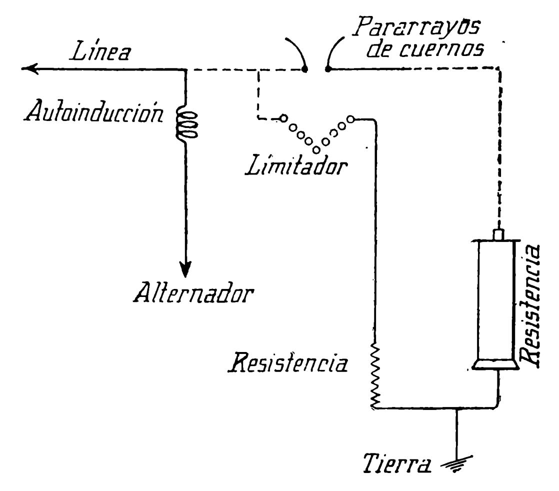


Fig. 97.

Medida de una resistencia de pararrayos.—Se puede medir esta resistencia por los procedimientos indicados en el tomo II («Medidas eléctricas industriales», pág. 42), para las resistencias líquidas.

También se puede determinar fácilmente dicha resistencia por medio de un wattímetro, utilizando una corriente alterna. Se efectúa para ello el montaje indicado en la figura 98; el carrete de hilo grueso es atravesado por una corriente constante I durante el tiempo, muy corto, que se emplea en hacer la medida; esta corriente se obtiene uniendo los extremos del carrete a un generador a través de lámparas montadas entre sí en paralelo, y en serie con el carrete.

El circuito de hilo fino está derivado entre los bor-

nes del generador, y con un inversor se puede poner en serie con este carrete la resistencia que se trata de medir, o ponerla en cortocircuito.

Esta resistencia y la del carrete de hilo fino tienen un valor despreciable, de manera que si d_1 es la des-

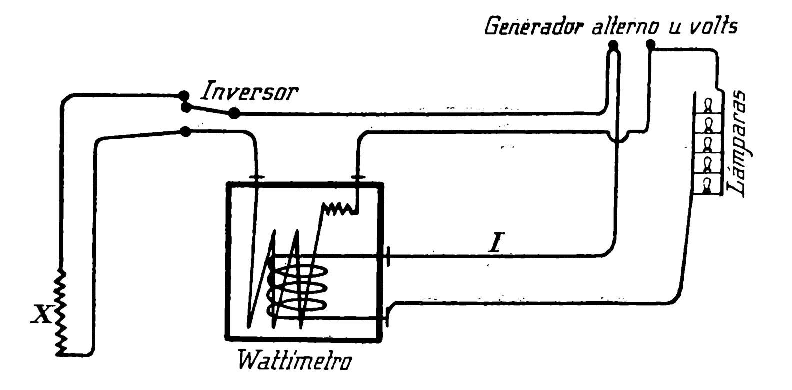


Fig. 98.

viación leída en el wattímetro cuando la resistencia x que se mide está en serie con el hilo fino, se tiene, siendo la corriente en este carrete $\frac{u}{x+r}$ (u es la tensión del generador y r la resistencia del carrete de hilo fino):

$$d_1 = K \frac{u}{x+r}.$$

Cuando la resistencia está en cortocircuito, la desviación leída es d_2, y se tiene:

$$d_2 = K \frac{u}{r}$$

por consiguiente, dividiendo ambas expresiones:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{r}{x + r}, \text{ de donde, } x = \frac{d_2 - d_1}{d_1} r.$$

Pararrayos con condensador.—Una buena protección contra las sobretensiones se obtiene colocando en lugar del pararrayos de cuernos un sistema de capacidades de poca superficie, ordinariamente alojadas en tubos de vidrio. Estas capacidades producen un equilibrio de tensión que se rompe para una elevación brusca. El montaje es el mismo que para los pararrayos de puntas.

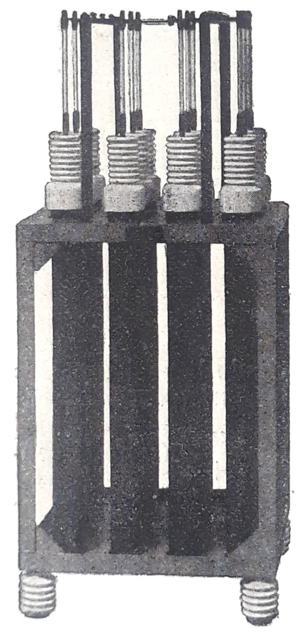


Fig. 99.

Los condensadores que han dado los mejores resultados son los aparatos Moscicki, construídos por la «Sociedad general de condensadores eléctricos de Friburgo». Estos condensadores consisten en un tubo de vidrio de cuello reforzado; la armadura interna es una ligera capa de plata depositada químicamente, y la armadura externa es también una capa de plata con otra capa superpuesta de mayor espesor, de cobre. La armadura interna está unida a un contacto superior a través de un aislador acanalado fijado al vidrio; la armadura externa está unida a un contacto dispuesto en la parte inferior del tubo. El tubo de vidrio está situado dentro de otro tubo de palastro unido al contacto inferior, y el espacio entre

los dos tubos está lleno de una mezcla incongelable de agua y glicerina; estos tubos se montan en paralelo, formando baterías (figs. 99 y 100).

Generalmente a estos aparatos protectores contra las sobretensiones de alta frecuencia, debidas a los rayos, se agregan otras clases de aparatos destinados a la protección contra las cargas estáticas y las sobretensiones de baja frecuencia.

Las cargas estáticas las adquieren los conductores cuando hay nubes electrizadas cerca de los mismos; se

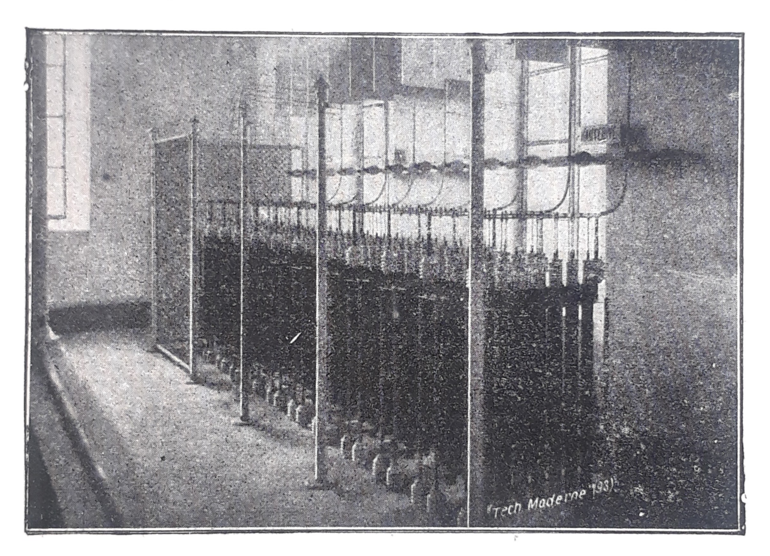


Fig. 100.

hace que estas cargas pasen a tierra en forma de corriente continua, uniendo la línea con un carrete de autoinducción con núcleo de hierro que no deja pasar más que una pequeña corriente bajo la tensión alterna de la red, pero cuya resistencia óhmica es lo bastante pequeña para permitir el paso a la corriente continua (de 3 a 400 ohms).

Las sobretensiones de baja frecuencia se deben a las variaciones bruscas en el régimen de la red, ruptura de cortocircuito, etc. [1]. Para evitar los accidentes que pueden producir estas sobretensiones, se disponen entre la línea y tierra varios explosores en paralelo, de la forma que se ve en la figura 101. Cuando la tensión pasa de un cierto valor, salta una chispa entre los explosores, en unos después que en

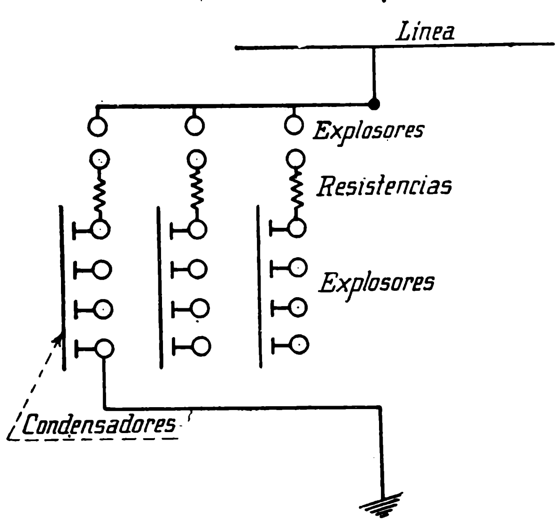


Fig. 101.

otros, con lo cual se evita la ruptura brusca y por consiguiente una nueva causa de sobretensión. Además, para cada serie de explosores, la chispa se propaga progresivamente bajo tensiones decrecientes. Se han construído válvulas de esta clase introduciendo en un tubo de vidrio, que contiene en la parte superior el primer explosor regulable, la resistencia de los

(1) Tomo I, Generalidades, pág. 485.

otros explosores y los condensadores; el sistema tiene la forma representada en la figura 102 (válvulas Gilles).

La figura 103 es el esquema de la instalación de

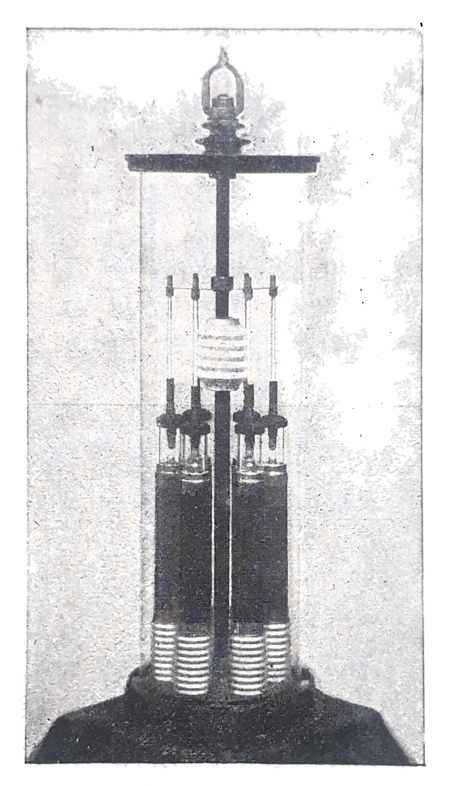


Fig. 102.

estos diferentes aparatos de protección y de sus posiciones sobre las líneas.

La figura 104 representa la instalación de los condensadores Moscicki en una estación de transformación, de 600 KVA a 50000 volts.

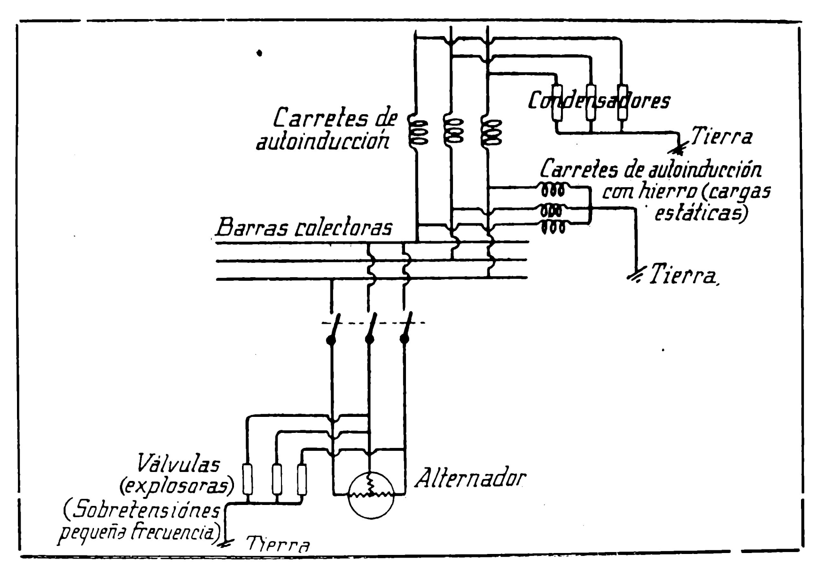


Fig. 103.

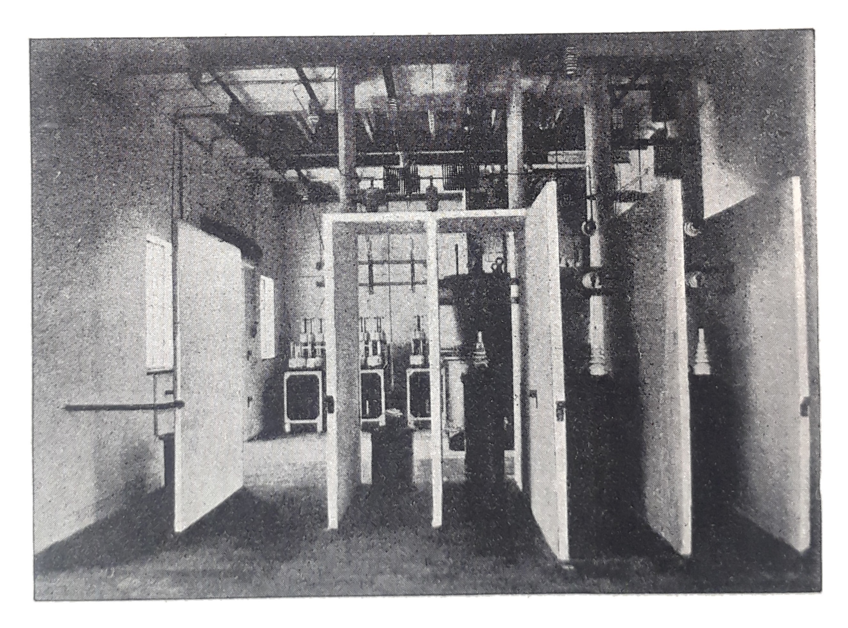
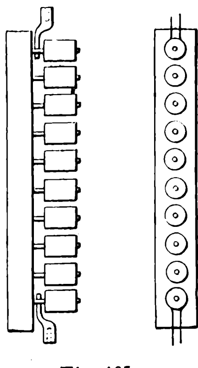


Fig. 104.

Pararrayos de rodillos.—Son aparatos que dan lugar a un escape continuo de las corrientes debidas a las altas tensiones. Se ponen en cortocircuito, como los pararrayos de cuernos, delante de un carrete de autoinducción sin hierro, y se unen a tierra. Están formados por una serie de cilindros de metal antiarco (aleación a base de zinc; los cilindros de los pararrayos de la Compañía Thomson Houston son de latón), separados por intervalos de 0,8 milímetros (fig. 105). El número de estos cilindros está determinado por la tensión de régimen, y desempeñan el


Fig. 105.

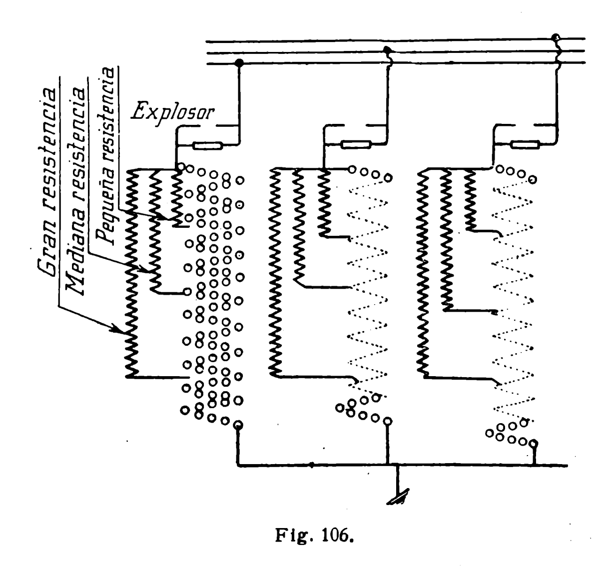


Fig. 106.

papel de condensadores, que se cargan bajo la influencia de la tensión de la línea y se descargan poco a poco,

resultando así el *chisporroteo* continuo que se produce en ellos.

Para permitir la protección contra las sobretensiones de diferentes valores y frecuencias, la Compañía Thomson Houston construye pararrayos que llevan en su extremo, unido a la línea, un explosor y un fusible, en paralelo uno sobre otro, y el conjunto de ambos en

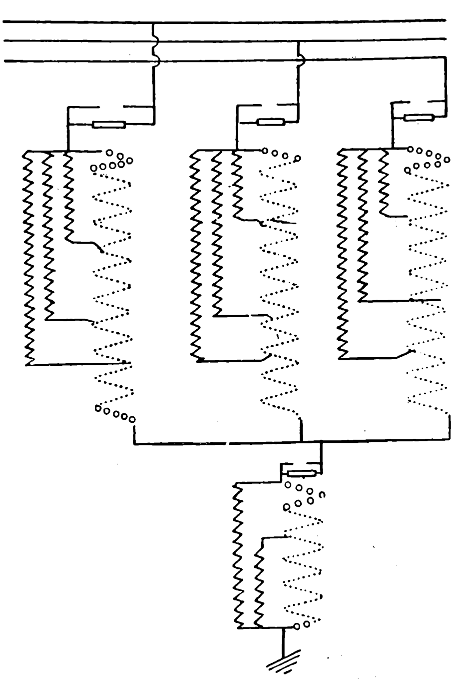


Fig. 107.

serie con los cilindros. Además, estos cilindros están shuntados por resistencias dispuestas como indica la figura 106.

Si la instalación que hay que proteger está montada en estrella, no estando el punto neutro unido a tierra, se hace el montaje que representa la figura 107.

Pararrayos electrolíticos.—Dos láminas de aluminio sumergidas en una solución alcalina constituyen bajo la tensión normal una capacidad muy elevada que cae hasta un valor muy bajo en cuanto la sobretensión alcanza un *valor crítico.*

La Compañía Thomson Houston construye pararrayos que utilizan esta propiedad. Están formados estos aparatos por una serie de cubetas cónicas de aluminio recubiertas con una película de hidróxido de aluminio, superpuestas y separadas unas de otras por

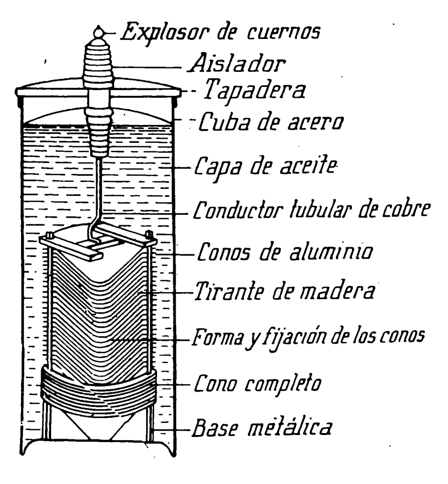


Fig. 108.

un intervalo que varía entre 7,5 milímetros para tensiones próximas a 20000 volts, y 10,6 milímetros para tensiones superiores.

En cada una de estas cubetas hay un electrolito recubierto con una ligera capa de aceite para evitar su evaporación; esta capa de aceite transmite también por conductibilidad el calor a la masa cuando las descargas repetidas calientan los electrodos (fig. 108).

El sistema total de conos se sumerge en una cuba llena de aceite; este aparato se monta entre la línea y la tierra con un explosor en serie; este explosor es de cuernos, y se regula para un voltaje ligeramente superior al de la red, pudiendo los cuernos ponerse en contacto, a voluntad y bajo tensión.

Para los circuitos trifásicos, hasta 7500 volts, los elementos que componen un pararrayos se agrupan en una misma cuba; para tensiones más elevadas, se dispone una cuba en cada fase, de modo que cuando

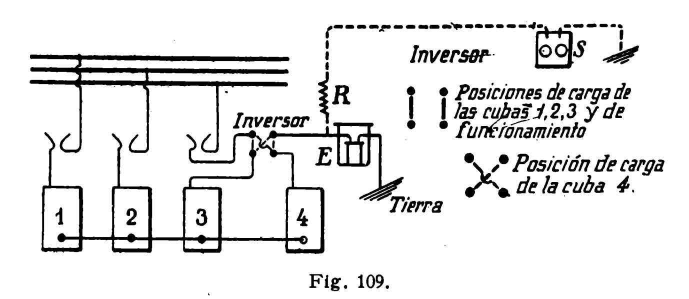


Fig. 109.

el punto neutro no está unido a tierra, hay cuatro cubas.

Para conservar la película de hidróxido que recubre los conos, se hace pasar todos los días una corriente por los aparatos, acercando los dos cuernos de cada explosor de modo que salte un arco y deje pasar así una corriente de un ampere aproximadamente. En el caso de circuito trifásico con un punto neutro aislado, mediante un inversor de dos láminas se puede substituir la serie de conos unida a tierra por una de las otras tres, al formarse la capa de hidróxido (fig. 109).

Señal de alarma. — Puede suceder que sobre un circuito de punto neutro aislado se ponga una de las fases en comunicación con la masa por un arco

oscilante; la descarga puede prolongarse durante un tiempo muy largo, lo cual ocasionaría el deterioro del aparato. Por lo tanto, es prudente disponer una señal de alarma que advierta al personal estas condiciones anormales de marcha. La señal de alarma está formada por un elemento de aluminio *E* (fig. 109), derivado entre la cuarta cuba y tierra, y en shunt con este elemento, un circuito que comprende un timbre *S* y una resistencia *R* en serie; la descarga a través del elemento *E* produce una diferencia de potencial suficiente para el funcionamiento del timbre.

Limitadores hidráulicos.—Están constituídos por

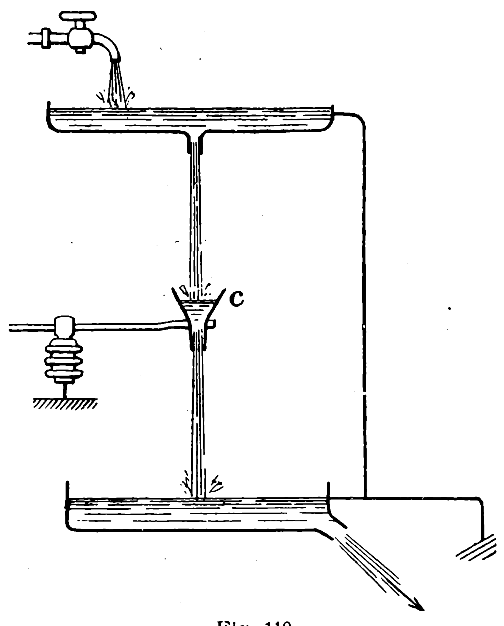


Fig. 110.

un chorro de agua hacia abajo o hacia arriba (figs. 110 y 111). En los primeros sale un chorro de agua de un

depósito por un orificio convenientemente dispuesto; este filete líquido cae sobre una cápsula *C* que se vacía, por un orificio de igual gasto, en un depósito inferior. La cápsula metálica *C* está sostenida por un aislador y unida a la línea; los dos depósitos, que también son de metal, están unidos a tierra. La longitud del chorro

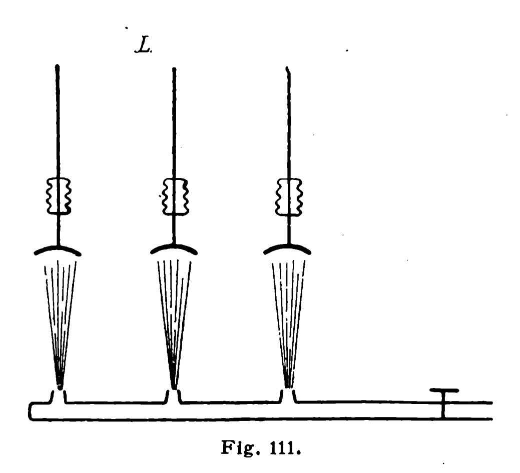


Fig. 111.

de agua constituye la resistencia, y la puesta a tierra se regula de modo que la corriente en el circuito de protección sea normalmente de 0,08 a 0,015 amperes. Sobre cada fase se dispone un limitador de esta clase.

Los limitadores de la segunda clase están constituídos por un tubo conductor de agua, puesto a tierra, del cual salen hacia arriba chorros que van a chocar con cápsulas metálicas unidas a los conductores de la línea *L* (fig. 111). La regulación se hace modificando la altura de las cápsulas de manera que en régimen normal se obtenga una corriente aproximada de 0,1 ampere. Sobre el circuito de tierra, los miliamperímetros que a veces se disponen para comprobar el gasto y que son fijos, deben ponerse en cortocircuito por un ruptor

que únicamente se abre en el instante de hacer la medida de comprobación. Las distancias están dadas por la tabla siguiente (Maljournal y Bourron):

Tensión de servicio	Altura media del chorro	Distancia normal entre chorros	Diámetro de los orificios	Gasto medio por polo y por hora
6000	150 mm	500 mm	10 mm	750 litros
10000	200 »	600 »	10 »	850 »
15000	300 »	800 »	8 »	700 »
25000	400 »	1000 »	8 »	800 »
35000	500 »	1300 »	6 »	500 »
55000	650 »	1500 »	6 »	550 »
70000	800 »	1800 »	6 »	650 »

Central generatriz de corrientes de alta tensión

Como ya hemos visto anteriormente, un cuadro lleva los aparatos de comprobación y de maniobra que están todos bajo tensión reducida. Los aparatos voltimétricos son maniobrados por los secundarios de transformadores de tensión, y los aparatos amperimétricos por los secundarios de transformadores de intensidad. En cuanto a los aparatos de maniobra, son accionados a distancia por transmisiones mecánicas o eléctricas mediante solenoides o motores alimentados por corrientes a baja tensión.

En las centrales que producen potencias considerables bajo tensiones elevadas, los aparatos de maniobra, interruptores, ruptores, disyuntores, etc., los transformadores de medida, las barras colectoras, etc., están aislados en casillas especiales. Las maniobras se hacen desde el cuadro, y los circuitos secundarios de los transformadores de medida están unidos a este cuadro.

La Compañía Thomson ha instalado en algunas centrales, para abrir y cerrar los interruptores, motores maniobrados desde el cuadro por un pequeño conmutador que acciona un relevador magnético cuyo núcleo hace cerrar el circuito del motor. Una triple leva, que obra sobre tres dedos distintos de contacto,

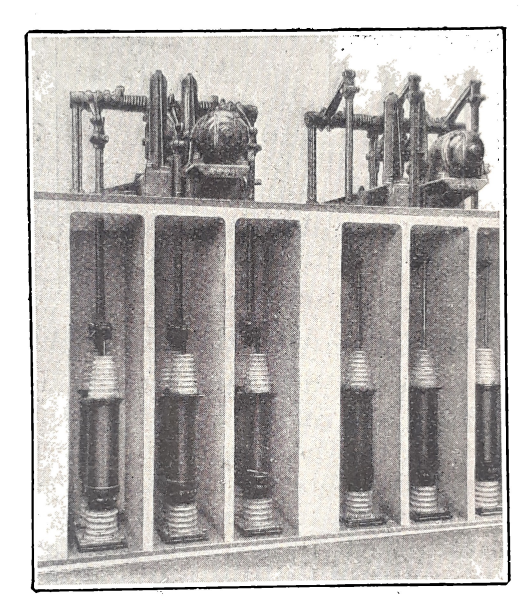


Fig. 112.

asegura el funcionamiento del sistema, que se para por sí solo cuando el circuito está completamente abierto. La ruptura brusca la produce la acción de dos muelles muy potentes que abren el interruptor (fig. 112). Gracias a la maniobra adecuada de los dedos de contacto, una lámpara roja se enciende en el cuadro si el interruptor está cerrado, y una verde si está abierto.

Por último, si se produce una sobrecarga determinada, un relevador bipolar, de tiempo, alimentado por

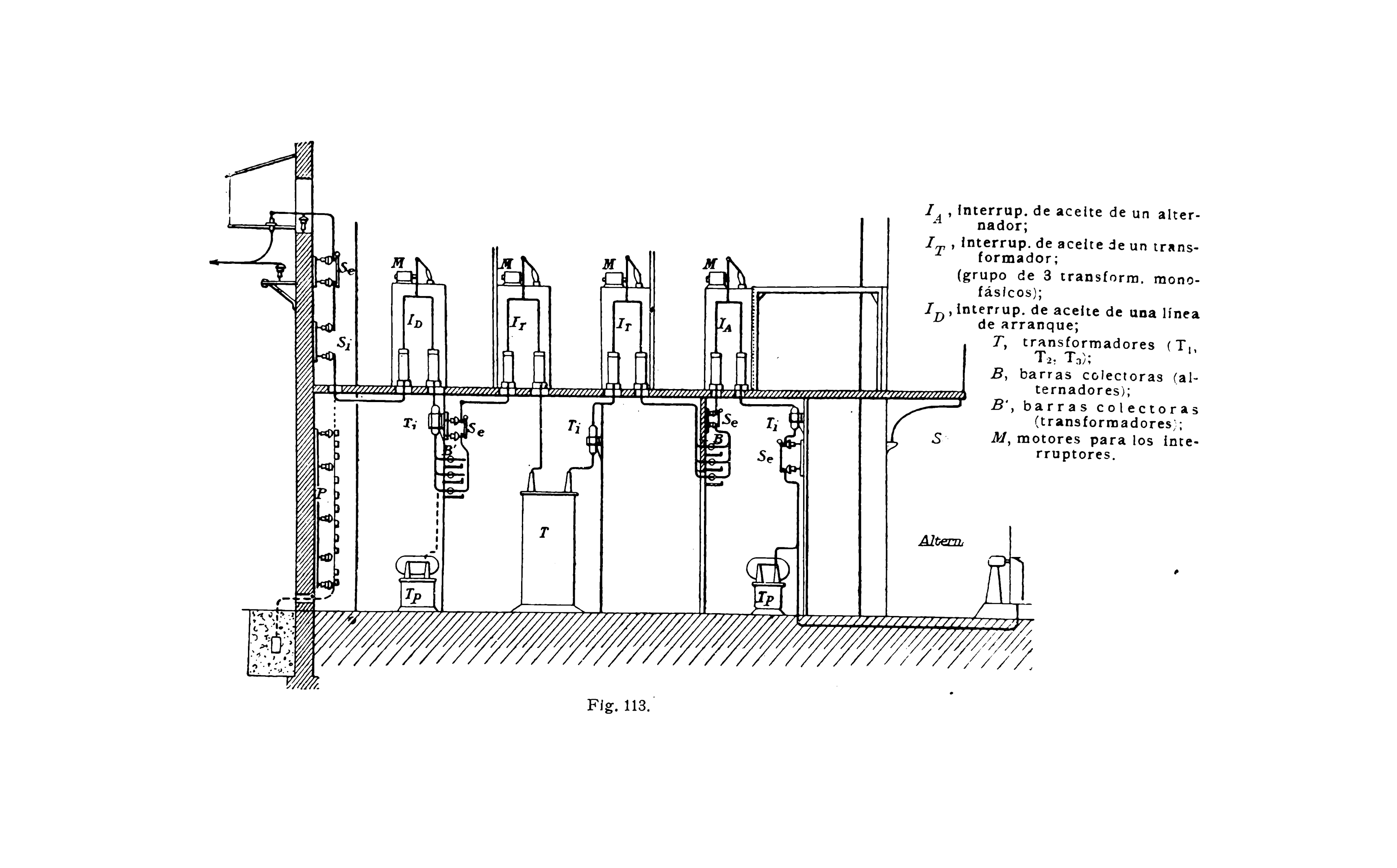

M
M
M
M
I_D
I_T
I_T
I_A
Se
Si
Se
Se
Se
T_i
T_i
T_i
B'
B
P
T
T_p
T_p
S
Altern.
I_A, interrup. de aceite de un alternador;
I_T, interrup. de aceite de un transformador;
(grupo de 3 transform. monofásicos);
I_D, interrup. de aceite de una línea de arranque;
T, transformadores (T_1, T_2, T_3);
B, barras colectoras (alternadores);
B', barras colectoras (transformadores);
M, motores para los interruptores.

Fig. 113.

el circuito secundario de dos transformadores de corriente, abre el interruptor bruscamente.

En la figura 114 se ve el esquema de montaje de alternadores cuya tensión es elevada por medio de transformadores. Los circuitos de alta tensión y los aparatos bajo esta tensión están indicados con trazos fuertes, y van colocados en células que ocupan un local anexo a la sala de máquinas, como se ve esquemáticamente en la figura 113. El cuadro lleva: los paneles de alternadores, los paneles de transformadores, los de arranque o distribución, los de las comutatrices y los de servicio interior de la central.

Cada panel de alternador contiene: un voltímetro, dos amperímetros, un indicador de factor de potencia, un wattímetro, un contador, un reostato de campo, un interruptor de campo con resistencia de descarga, un conmutador con dos lámparas indicadoras para la maniobra del interruptor de aceite, un conmutador para la regulación de la velocidad del motor a que está acoplado el alternador, y un tope de sincronización.

Cada panel de transformador tiene: un amperímetro, dos relevadores de escape (de tiempo) y dos conmutadores de maniobra con lámparas indicadoras para los interruptores de aceite, y un tope de sincronismo.

Cada panel de arranque o distribución lleva: tres amperímetros, dos voltímetros, un conmutador de maniobra con lámparas indicadoras para el interruptor de aceite, y un relevador de escape, de tiempo (fig. 23).

El montaje de los aparatos de sincronización, de los circuitos de excitación, etc., es el mismo que el dado por el esquema de la figura 69.

El circuito de excitación alimenta con corriente continua los circuitos auxiliares de disyuntores, relevadores, motores de maniobra, lámparas indicadoras, etc.

Una derivación carga una batería de acumuladores

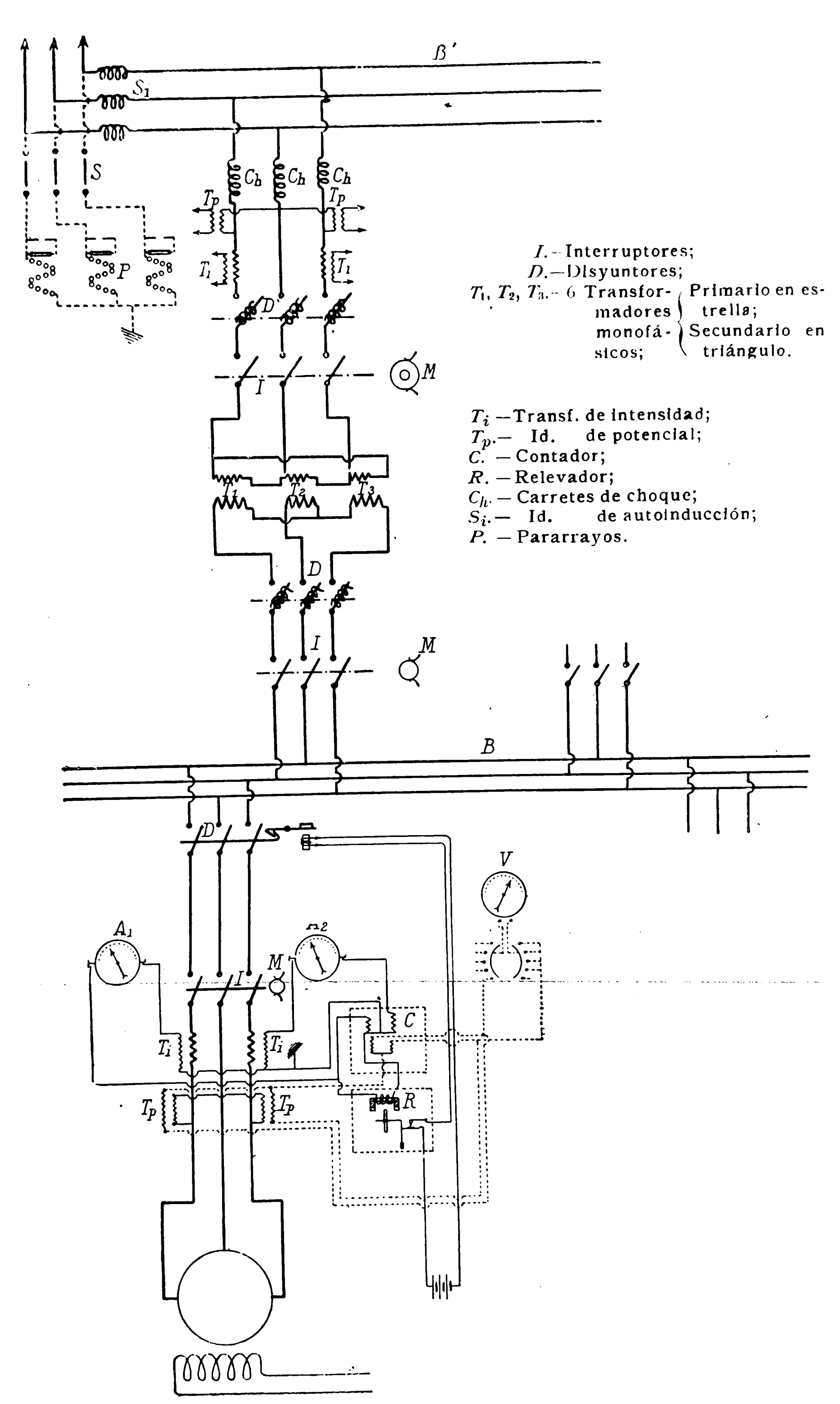

B'
S1
S
P
Ch
Ch
Ch
Tp
Tp
T1
T1
D
M
I
T1
T2
T3
D
I
M
B
D
A1
A2
V
M
I
C
Ti
Ti
R
Tp
Tp
I.—Interruptores;
D.—Disyuntores;
T1, T2, T3.—6 Transformadores monofásicos; Primario en estrella; Secundario en triángulo.
Ti —Transf. de intensidad;
Tp.— Id. de potencial;
C. —Contador;
R. —Relevador;
Ch. —Carretes de choque;
Si.— Id. de autoinducción;
P. —Pararrayos.

Fig. 114.

para el alumbrado de socorro y para el escape de los automáticos, en caso de avería en el circuito continuo.

Transformadores de medida.—Los transformadores

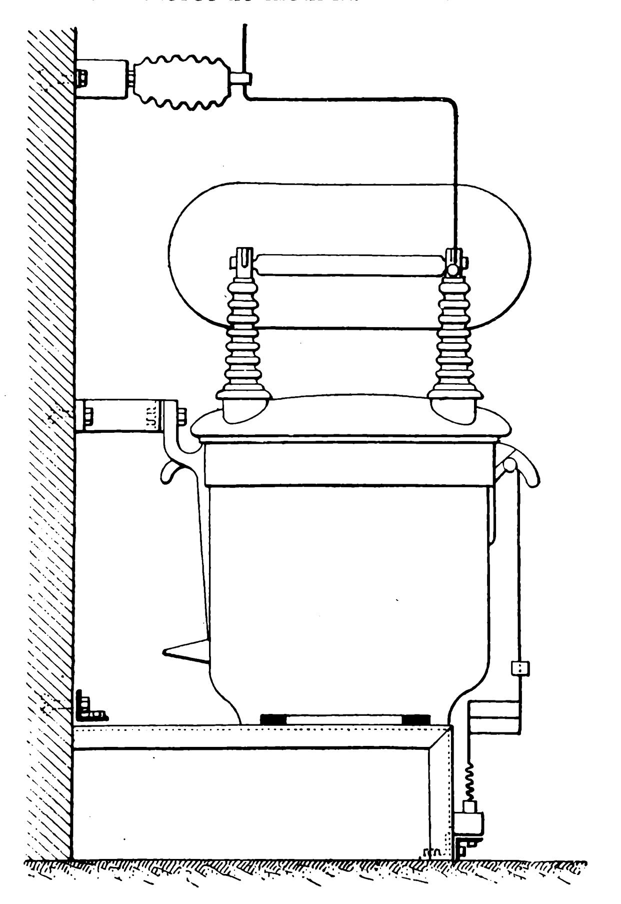


Fig. 115.

de intensidad (fig. 68) son generalmente de devanados al aire libre (por lo menos hasta los 20000 volts), y su circuito magnético lleva unas patas que permiten

fijarlos sobre hierros empotrados en los muros. Los circuitos secundarios alimentan no solamente los amperímetros, sino también los relevadores, contadores, wattímetros, etc. Por encima de 20000 volts, los devanados van contenidos en aceite y los aparatos colocados sobre el suelo.

Los transformadores de potencial tienen los devanados sumergidos en aceite y fijados sobre hierros por la caja que contiene el aceite, que está puesta a tierra (fig. 115). Los circuitos secundarios alimentan no solamente los voltímetros, sino los relevadores, los contadores y los wattímetros (carretes de tensión). Los circuitos primarios están frecuentemente provistos de fusibles, dispuestos entre pinzas sostenidas por aisladores fijados en la tapa.

Barras ómnibus. — Las barras ómnibus del circuito

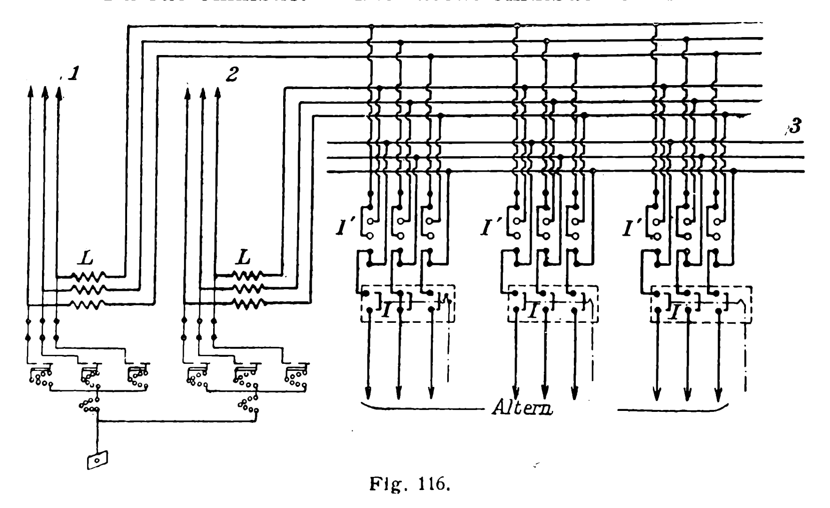


Fig. 116.

de alta tensión están agrupadas en dos, tres o varios circuitos paralelos, que permiten la alimentación de cualquier línea 1, 2, 3, con cualquier alternador (fig. 116);

en esta figura se ven en *I* los interruptores de aceite, y en *I'* los conmutadores. Esta condición puede satisfacerse también con la disposición *en lazo,* hacién-

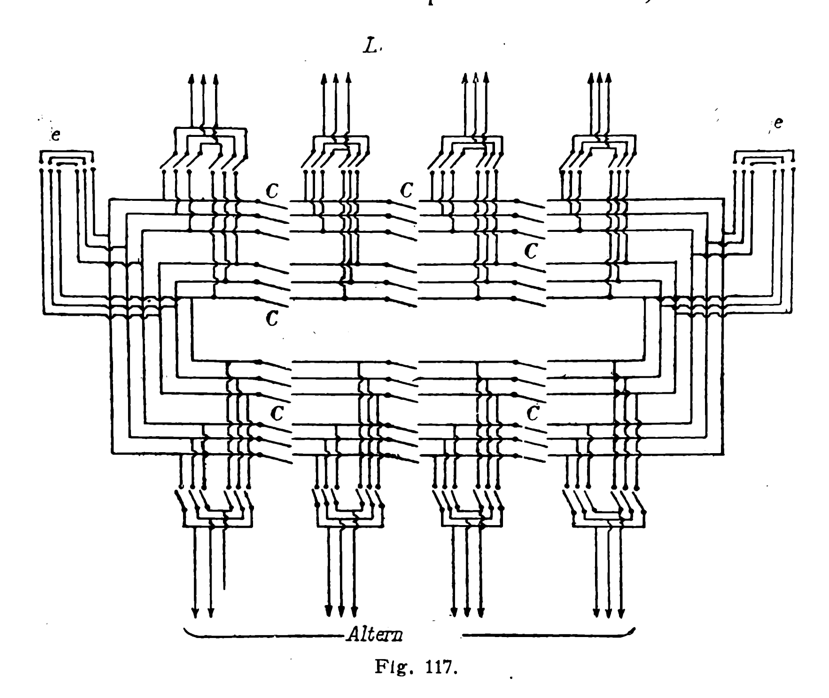


Fig. 117.

dose las diferentes combinaciones por medio de juegos de ruptores (fig. 117); *ee* son interruptores de acoplamiento, y *L* las líneas.

Acoplamiento en paralelo de transformadores elevadores. — En las estaciones generadoras para las cuales la tensión se eleva mediante transformadores, se encuentran a veces dificultades para realizar la marcha *sintónica* de los transformadores. En efecto, estos transformadores, acoplados en paralelo sobre la alta y sobre la baja tensión, toman desigualmente

la carga si sus características no son exactamente idénticas. Para evitar este inconveniente, se tiende a adoptar la disposición siguiente: cada alternador tiene su transformador propio, no haciéndose el acoplamiento en paralelo en la *B T*, acoplándose solamente los circuitos *A T*, y de este modo se evitan las corrientes de circulación de un transformador hacia el otro.

Sin embargo, hay diversos modos y artificios de asegurar la distribución de la carga en el primer caso, como, por ejemplo, poner en circuito la autoinducción, el transformador, compensador, etc. para tener una caída igual de tensión para una igual proporción de carga.

Hay que tener en cuenta, para la claridad de esta observación, que la carga de un transformador está limitada por el número de kilovolts-amperes producidos, independientemente del factor de potencia, siendo por lo tanto la carga función de la corriente.

CAPÍTULO III

Transformación de corriente por transformadores estáticos

I.—Subestaciones

La transformación de una corriente puede interesar a las características de esta corriente: tensión, intensidad, frecuencia, o bien a su misma forma (continua en alterna, etc.).

Una subestación o una estación de transformación estará, por lo tanto, constituída por un grupo de transformadores directos, estáticos o giratorios, o bien por un grupo de conversores (motor-generador), los cuales se emplean generalmente para el cambio de forma de corriente (alterna en continua).

La transformación de corriente continua en continua de tensión o intensidad diferentes, interesa en general a máquinas de regulación que sólo son accesorios de las máquinas principales; muy raras veces constituye el objeto de instalaciones particulares; los casos más normales ya han sido considerados anteriormente: elevadores-reductores de tensión, grupos de equilibrio, grupos Léonard, etc.

La transformación de la tensión es la más importante, industrialmente hablando.

Transformadores estáticos. — Una subestación de transformadores elevadores o reductores de la tensión, es de instalación muy delicada, a causa de las tensiones elevadas que entran en juego.

Para las grandes potencias y las altas tensiones, superiores a 15000 volts, se agregan generalmente a la central o estación generadora, transformadores elevadores, directamente alimentados por el cuadro de los alternadores. La corriente de alta tensión enviada a la línea *x* se reduce a una tensión normal para la utilización en el lugar donde ha de ser empleada.

La reducción de la tensión puede hacerse ventajosamente en dos partes, es decir, de un modo escalonado, para las centrales de gran radio de acción. Por ejemplo, un central tiene transformadores elevadores a 70000 volts, transportando energía a 60 kilómetros; en el extremo de la línea, una estación reduce la tensión a 15000 volts, y la corriente bajo esta tensión alimenta una región que alcanza 10 kilómetros a la redonda; la tensión de 15000 volts se reduce después a una tensión ordinaria en los puutos de utilización.

Transformador. — Todo transformador debe estar colocado de un modo fijo sobre un suelo duro, de manera que las vibraciones no puedan moverlo en nada de su sitio. Para evitar los peligros de incendio, no debe estar nunca el transformador cerca de ninguna pieza combustible.

La conservación de un transformador sólo requiere visitas de revisión de tarde en tarde; la casilla que lo encierra debe estar siempre cerrada, pero ha de presentar ciertas aberturas para que el aire pueda circular por su interior. Con objeto de refrigerar el transformador, la masa de éste se pone a tierra.

Transformador en aceite. — Ha de haber un dis-

positivo de elevación para poder sacar los devanados del aceite y hacer las revisiones necesarias, sin que sea preciso vaciar la cuba. El aceite que se emplea es aceite mineral no purificado químicamente, sino refinado por destilación, y no debe contener agua. La deshidratación puede conseguirse con una calefacción prolongada o por introducción en el aceite de fragmentos pequeños de sodio. Se puede calentar el aceite mediante resistencias constituídas por tubos metálicos aislados en anillos de porcelana. Estas resistencias están agrupadas de modo que formen un cuadro y se disponen verticalmente, sumergiendo el cuadro completamente en el aceite. Las resistencias están unidas al circuito de baja tensión de la central, y el aceite calentado por los tubos se eleva rápidamente, mientras que el aceite frío penetra por la parte inferior, con lo cual se verifica una excelente agitación o mezcla de toda la masa.

El transformador se coloca en la cuba estando ésta vacía, y después se vierte el aceite, previamente desecado; esta operación de desecar o deshidratar el aceite debe hacerse con gran cuidado, y repetirse de vez en cuando después de cada desmontaje o paro algo largo del transformador.

Un buen aceite debe tener por características: 0,875 de densidad, y 300° de punto de inflamación; la temperatura no debe pasar de 45° sobre la del ambiente en marcha normal.

La superficie externa del transformador ha de estar muy bien aireada; en ningún caso debe colocarse la cuba contra una pared, ni en un rincón del local, siendo preciso dejar alrededor del transformador un pasillo de 30 cm. cuando menos, para la circulación de aire.

Transformadores ventiladores.—La instalación de estos transformadores supone o requiere la de un grupo

motor-ventilador (fig. 118). El motor del ventilador es

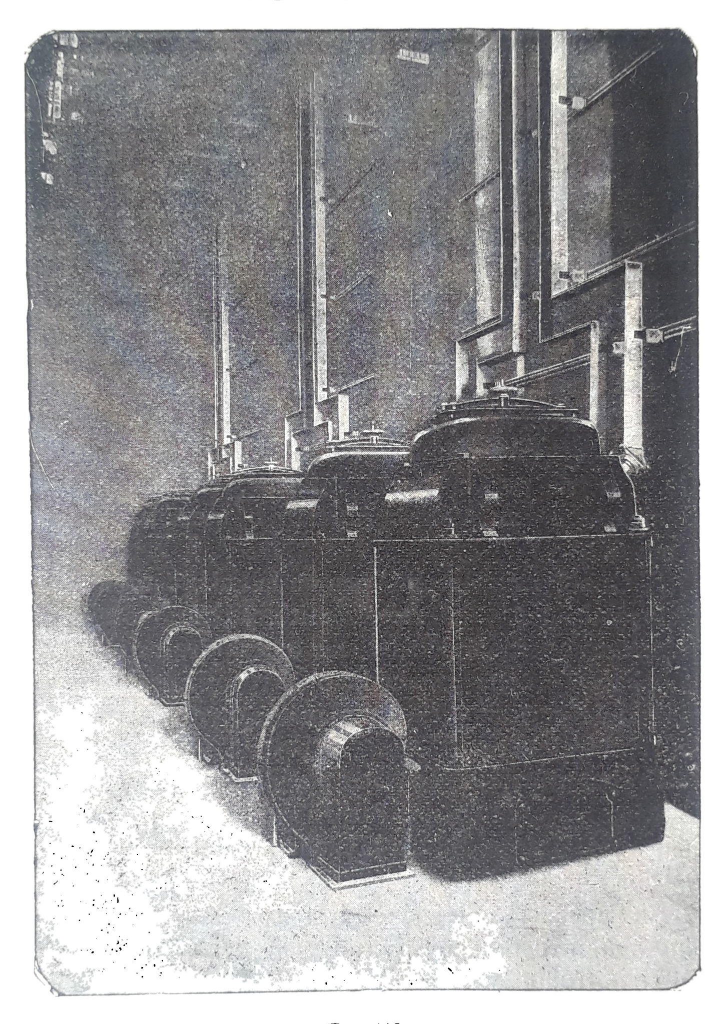


Fig. 118.

generalmente asincrónico y alimentado por la baja tensión del transformador, de modo que se pone en

movimiento en cuanto la corriente se cierra sobre el transformador.

A veces se disponen en los canales de llegada, filtros de aire formados por sacos de tela que presentan una gran superficie de filtración. En los canales de llegada de aire pueden ir los conductores de baja tensión. La presión del aire introducido es algo superior a la presión atmosférica, y el gasto de aire debe ser (Behn-Eschenburg):

$$\frac{P(1-\eta)}{1,1\theta} \text{ metros cúbicos por segundo } (^1),$$

donde P es la potencia del transformador en kilowatts, η el rendimiento, y θ el aumento de temperatura aceptado.

Transformadores en aceite con refrigeración por agua. — Para los transformadores de gran potencia hay necesidad de recurrir, para disipar el calor producido por efecto Joule y por histeresis, a un modo de refrigeración más intenso; el baño de aceite y la ventilación forzada no son suficientes, en estos casos, para la buena utilización másica.

Lo que se emplea en semejante caso es el baño de aceite refrigerado por una corriente de agua. Con este objeto, la cuba del transformador tiene dimensiones suficientes para alojar por encima de los devanados un serpentín sumergido en el aceite, y por el cual circula agua fría (fig. 119). La construcción de las cubas y de los conductos de refrigeración ha de ser especialmente cuidadosa para que no pueda producirse

(1) Esto equivale a decir que un metro cúbico de aire *consume* o *se lleva* unos 1100 watts por grado de elevación de temperatura, lo cual se admite generalmente en el establecimiento de la ventilación de una máquina, de cualquier clase que ésta sea.

ninguna comunicación entre agua y aceite. Con este sistema de refrigeración ha sido posible construir transformadores cuya potencia individual alcanza a 10000 kilowatts. La circulación del agua está garantizada y asegurada por un pequeño grupo moto-

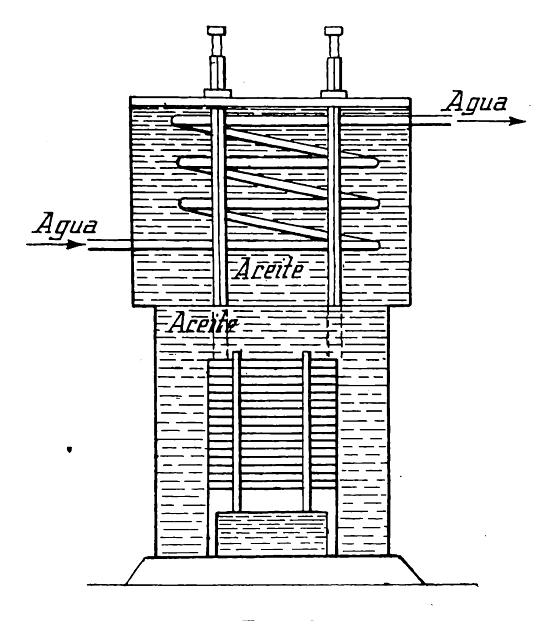


Fig. 119.

bomba. En las estaciones donde se dispone de mucha agua a poco precio, y por consiguiente, en las estaciones hidroeléctricas, se toma el agua de circulación en un punto cualquiera del canal de alimentación y se devuelve caliente. Si resulta costoso el consumo de agua, se hace que ésta recorra un ciclo continuo, refrigerándola después de su paso por el motor.

Cuando el agua tenga demasiado fango o esté cargada de sales, se hace pasar el aceite del transformador

por un serpentín sumergido en el agua fría (fig. 120); en *cc* se ven los canales de salida del aceite, en caso de romperse la cuba, y en *M* se ve el grupo moto-bomba.

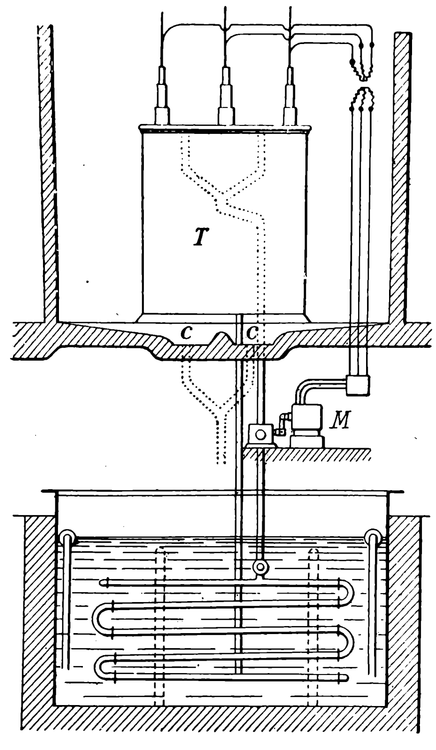


Fig. 120.

II.—Estaciones de transformadores

a) **Transformadores sobre postes.** — La reducción de tensión para una pequeña potencia, varias lámparas de alumbrado público o alimentación de una casa cerca de una línea de alta tensión, se hace ordinariamente con un pequeño transformador colocado sobre

postes. Para ello se colocan uno junto a otro dos postes de dimensiones convenientes, uno de los cuales lleva los aisladores que soportan al circuito *AT*, y el otro los aisladores del circuito *B T*. Sobre los postes se fija un marco metálico de manera que presente un apoyo estable a un pequeño transformador. Los bornes de este transformador están unidos por una y otra parte a las

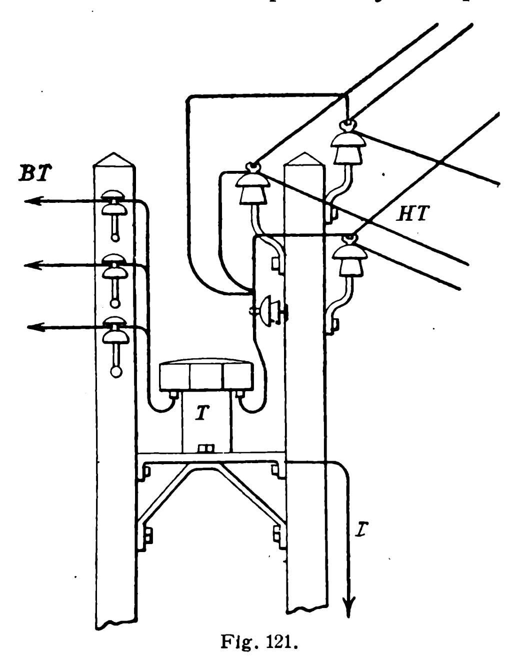


Fig. 121.

líneas *A T* y *B 1*, y un conductor une las partes *masas* a tierra (fig. 121).

Generalmente este dispositivo no lleva ningún interruptor, estando protegido por fusibles, y el punto neutro de baja tensión va unido a la masa.

b) **Caseta de transformación.** — El transformador sobre postes sólo puede emplearse tratándose de peque-

ñas potencias; sin embargo, haciendo la instalación sobre cuatro postes, se puede colocar un transformador de unos diez kilowatts, pero es más económico y seguro

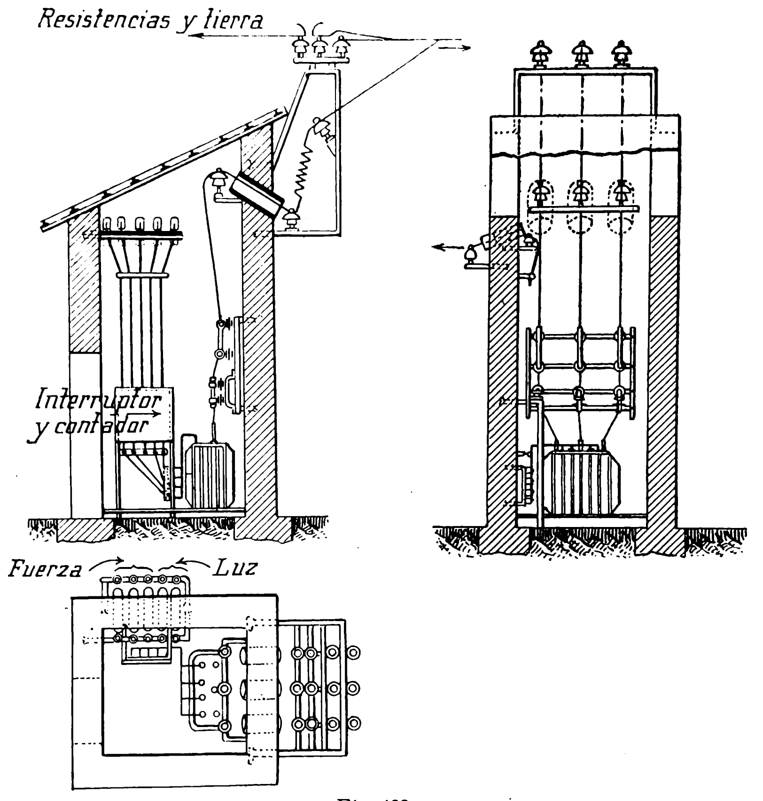


Fig. 122.

instalar una caseta, lo cual se hace del modo indicado en el esquema de la figura 122, cuando se trata de distribuir energía en una pequeña red.

La llegada *A1* se hace sobre un saliente en que van instalados los pararrayos; los carretes de autoinducción pueden estar por fuera o por dentro de la caseta.

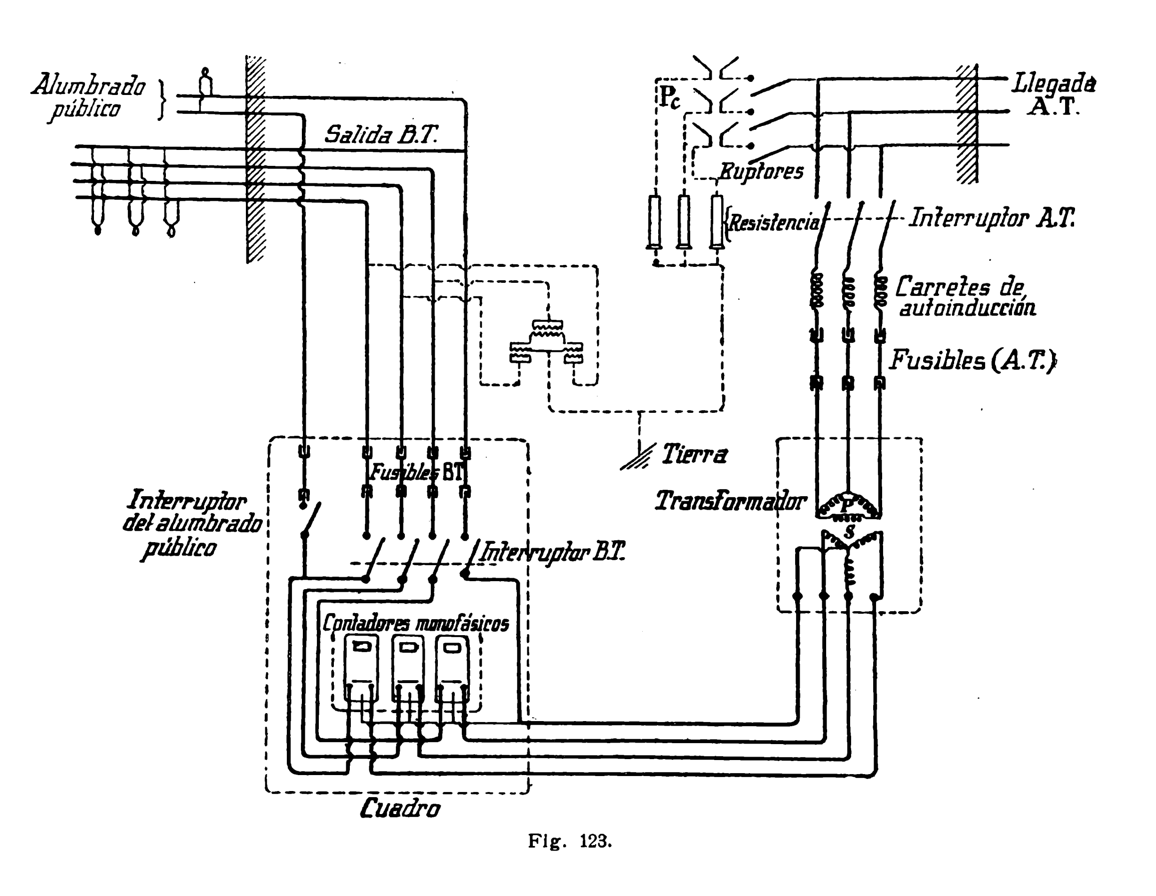
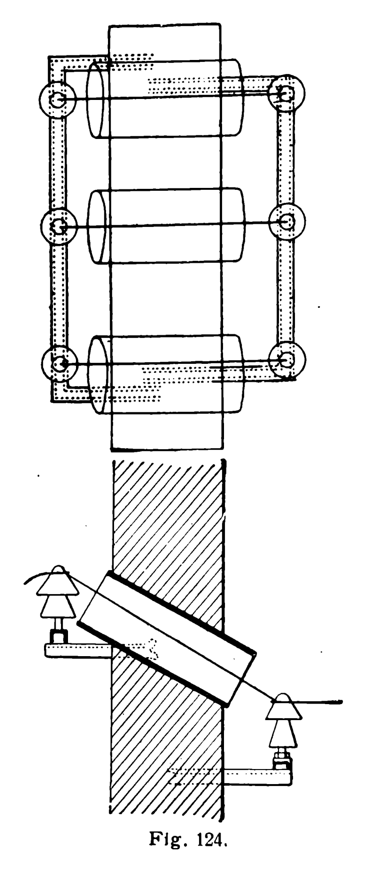

Alumbrado público
Salida B.T.
P_c
Ruptores
Llegada A.T.
Resistencia
Interruptor A.T.
Carretes de autoinducción
Fusibles (A.T.)
Tierra
Transformador
P
S
Fusibles BT
Interruptor del alumbrado público
Interruptor B.T.
Contadores monofásicos
Cuadro

Fig. 123.

La apertura *A 1* se hace con ruptores y fusibles que impidan una corriente excesiva. El primario del transformador está montado generalmente en triángulo y el secundario en estrella, permitiendo el punto neutro una distribución de cuatro hilos, por ejemplo a 220 volts entre los hilos de fase, y 127 volts entre el neutro de cada línea de fase. La luz se toma entre este neutro y las otras tres líneas, y los motores, entre las tres fases.


Fig. 124.

En algunos pueblos, el alumbrado público está dado por un hilo especial que se corta desde la caseta con un interruptor, y la luz se toma entre este hilo y el neutro (fig. 123). Se puede montar un contador monofásico sobre cada fase. Los fusibles de baja tensión, interruptores y contadores, están agrupados sobre un cuadro, como indica la figura 123. Los conductores entran y salen de la caseta por orificios practicados en las paredes de ésta, y frente a éstos, por el interior de la misma, hay aisladores montados sobre hierros fijados a la pared, y por fuera, aisladores sobre postes, o bien se hace la entrada y salida a través de tubos de vidrio o porce-

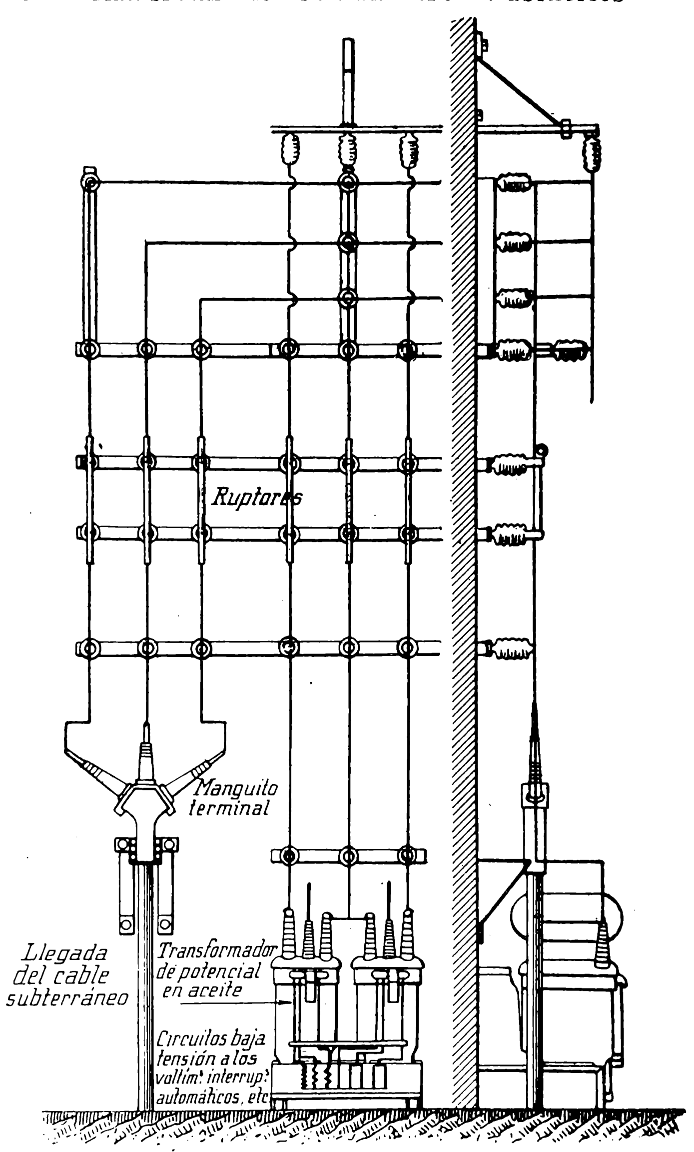

Ruptores
Manguito terminal
Llegada del cable subterráneo
Transformador de potencial en aceite
Circuitos baja tensión a los voltím.ˢ interrup.ˢ automáhcos, etc

Fig. 125.

lana (fig. 124). Si la red de alta tensión es subterránea, el cable remata en un manguito terminal sostenido por hierros y bridas (fig. 125).

c) **Estación reductora de utilización inmediata.** —

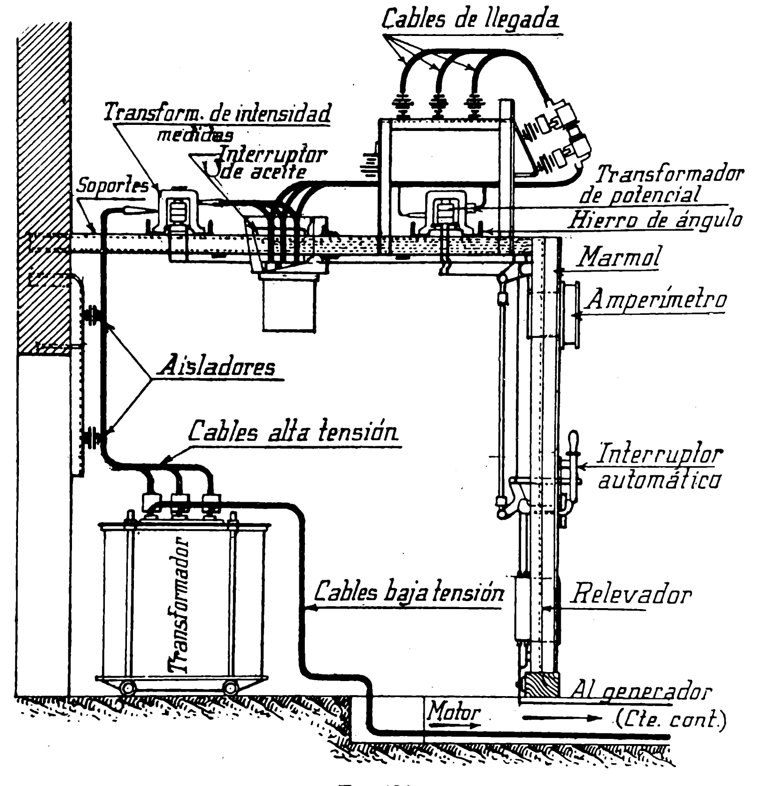


Fig. 126.

Cuando se utiliza una potencia algo importante, sobre todo para fuerza motriz, frecuentemente se recibe directamente la alta tensión, que se reduce después para la alimentación de los motores.

El local donde ha de instalarse el transformador debe tener las mismas condiciones que una cámara *A T* del cuadro, y ha de estar todo lo cerca posible del local de utilización, para que la línea *B T* no sea demasiado larga. La llegada de la línea *A T* se hace del modo acostumbrado, yendo los conductores *B T*, en alcantarillas a ser posible. Los aparatos anejos a la línea de *A T* son un disyuntor y transformadores de medida.

El contador está generalmente sobre el circuito de *A T*, porque la mayor parte de las tarifas están basadas en el gasto en *A T* y para un factor de potencia mínimo. Los aparatos de comprobación y maniobra están fuera de la caseta del transformador.

También se puede hacer una instalación de esta clase como indica la figura 126.

d) **Subestación de transformación.** — Las subestaciones de transformación reciben a gran distancia la corriente bajo una tensión muy elevada, 50000 volts, por ejemplo, y distribuyen la energía a toda su región bajo una tensión menos alta, de 12000 volts por ejemplo. Ordinariamente, estas subestaciones consisten en edificios de varios pisos; en la planta baja están los transformadores, los aparatos de maniobra y de comprobación; las barras ómnibus, los transformadores de medida y los interruptores están repartidos entre la planta baja y el primer piso, y en el último piso están los pararrayos y limitadores de tensión.

Para las tensiones muy altas, se separan los conductores de una distribución trifásica de tal modo que cada conductor esté alojado en una cámara particular, y que los interruptores de aceite estén separados en tres partes.

La colocación de los conductores es de las más sencillas, debiendo estar seguros de la resistencia mecánica

de los soportes, que no han de ofrecer la menor duda sobre su seguridad: todas las piezas metálicas *masa* están unidas a una buena tierra. Los circuitos de tensión reducida (secundarios de los transformadores de medida) van bajo tubos, y provistos de fusibles: el circuito de alumbrado es independiente de los disyuntores y tiene otro alumbrado de socorro; ningún circuito de alta tensión debe estar al alcance inmediato de la mano: las cámaras están cerradas o protegidas; en los sitios donde la ventilación es conveniente hay que evitar el empleo de puertas continuas, debiendo utilizarse un enrejado, como protección. Los pasillos de acceso a las cámaras deben estar expeditos y de fácil paso. En una subestación de importancia, una gran medida de seguridad consiste en numerar las cámaras y los aparatos de maniobra, con lo cual se consigue una precisión especial cuando se quiere poner fuera de circuito una parte de la instalación, para efectuar determinados trabajos.

Para todas las tensiones peligrosas, hay que dar las órdenes de apertura y cierre de circuito a una sola persona que cuida de los aparatos de cierre.

Para poner en circuito los transformadores, se pueden colocar en serie resistencias de choque destinadas a amortiguar la sacudida debida a la corriente magnetizante en el transformador; el disyuntor lleva entonces un pequeño contacto auxiliar. Esta disposición evita en cierta medida la producción de oscilaciones de tensión en la línea al cerrar o abrir el circuito. Las resistencias de choque empleadas en este caso están con frecuencia sumergidas en el aceite del interruptor, siendo su volumen muy reducido. Como estas resistencias sólo son recorridas por la corriente durante una fracción de segundo, su sección es muy pequeña.

Los disyuntores de los transformadores reductores

deben tener un escape de mínima para el caso en que la corriente de alimentación se corte, volver a entrar en servicio automáticamente.

Ruptores. — Los ruptores para alta tensión sirven generalmente para poner fuera de circuito una parte del cuadro, un interruptor; ya hemos visto que se manejan mediante una pértiga aislante, puesta a tierra.

Aparte de los ruptores secos, de ruptura al aire, se emplean ruptores en aceite, cuyos cuchillos de contacto son los únicos que entran en el aceite.

Para las tensiones muy altas, el tipo de pivote es preferible al tipo de simple apertura; un aislador central lleva la pinza de contacto y gira 90° sobre su eje, haciendo la ruptura simultáneamente en dos puntos, con lo cual se divide el arco si circula una corriente por la línea. El movimiento de rotación se obtiene con un mecanismo de retroceso, de cadena, que puede obrar sobre todos los ruptores de un mismo circuito. Al principio, sólo se debe maniobrar un juego de ruptores en circuito abierto.

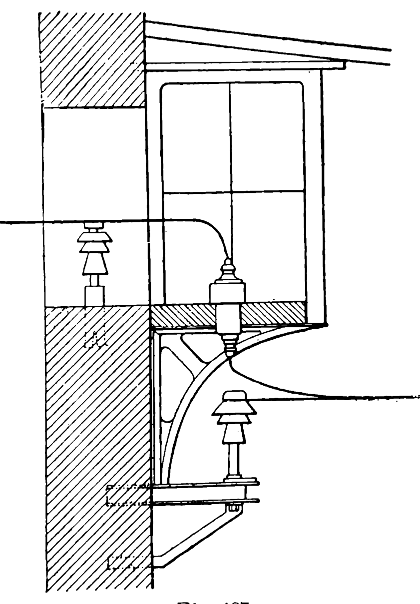


Fig. 127.

Entradas y salidas de las líneas. Paso de las

paredes. — Las líneas aéreas se sostienen mediante aisladores sólidamente fijados a las paredes del edificio, o empotrados sobre una plataforma, o atornillados sobre hierros (fig. 127). Las entradas de línea de alto voltaje se hacen por el techo, que exteriormente está dispuesto en terraza. Para ello se emplean aisladores

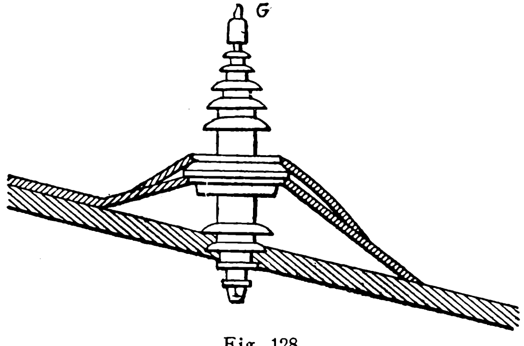


Fig. 128.

especiales (fig. 128); en la parte superior del aislador hay un pequeño receptáculo *G* con aceite que impide la formación y emisión de penachos en el extremo del aislador (fuego de San Telmo).

El esquema de montaje es el mismo de una estación de transformación con varios transformadores *T* (fig. 129), que pueden derivarse por medio de los inversores I_v sobre las barras B_1 o sobre las B_2.

Los circuitos de alimentación pueden también tomarse sobre uno u otro de estos juegos de barras ómnibus. Todos los aparatos y barras ómnibus están en cámaras individuales. Los interruptores automáticos de máxima *I* se maniobran a distancia, y mediante transformadores de medida se pueden comprobar los valores de la tensión y de las intensidades, al mismo tiempo que alimentan los circuitos de los wattímetros, contadores, etc., como ya hemos visto anteriormente.

El manejo y la comprobación de los aparatos por medio de lámparas de prueba se hacen generalmente

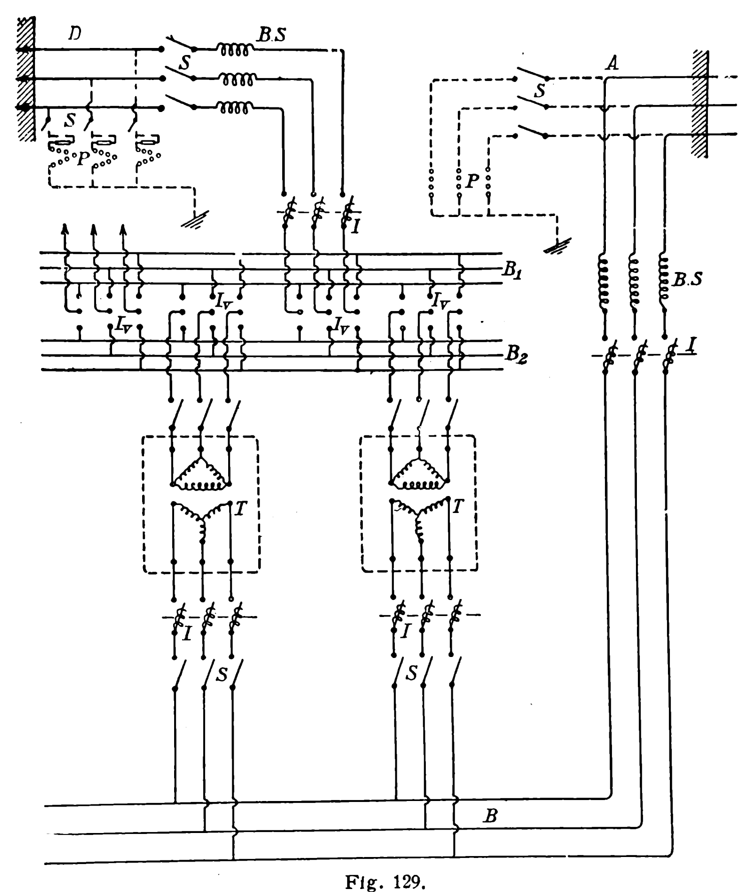


Fig. 129.

D, arranque o salida; *A*, llegada; *S*, ruptores; *BS*, carrete de autoinducción; *P*, pararrayos.

valiéndose de un circuito auxiliar de corriente continua que alimenta todas las transmisiones a distancia.

Tensión máxima	Distancia entre piezas bajo tensión mm				Distancia entre las barras ómnibus mm				Altura sobre el suelo de las piezas bajo tensión mm				Distancia mínima (de una fase a la otra) entre cuernos	Distancia mínima de una línea sobre los cuernos	Espacio ocupado por los pararrayos trifásicos (proyección horizontal)	Espacio ocupado por los interruptores de aceite trifásicos (proyección horizontal)		Longitud de las varas para los interruptores de cuchillo mm	Altura mínima de los interruptores de cuchillo mm	Espacio mínimo necesario para el manejo de los interruptores de cuchillo mm
	Interior		Exterior		Interior		Exterior		Interior		Exterior					Interior mm	Exterior mm			
	Mínima	Recomendada	Mínima	Recomendada	Mínima	Recomendada	Mínima	Recomendada	Mínima	Recomendada	Mínima	Recomendada								
2 300	95	102	153	203	153	203	203	305	51	76	102	153								
7 500	102	115	305	381	229	254	381	457	76	102	127	168								
15 000	127	165	457	534	254	305	508	610	89	127	153	203	1 219	1 524	1 524 × 2 743			1 219	2 134	1 677
22 000	190	229	661	762	305	381	915	991	153	191	203	254	1 321	1 829	1 524 × 2 743	660 × 2 083		1 521	2 438	1 982
35 000	305	381	838	915	457	559	965	1 042	254	305	280	356	1 524	2 134	1 524 × 3 353	861 × 2 185		1 828	2 540	2 438
45 000	407	483	1 066	1 168	610	686	1 270	1 372	356	407	356	432	1 880	2 439	2 743 × 4 267	1 016 × 2 540	1 219 × 3 150	2 438	3 353	2 896
70 000	610	762	1 524	1 676	915	1 067	1 829	1 981	534	610	584	661	2 489	3 048	3 353 × 5 182	1 219 × 3 150	1 219 × 3 607	3 658	4 572	4 115
90 000	813	966	1 829	2 032	1 219	1 372	2 235	2 438	686	813	737	864	3 048	3 353	3 962 × 6 706	1 524 × 3 507	1 524 × 3 708	4 267	5 182	4 572
110 000	966	1 219	2 032	2 286	1 524	1 676	2 540	2 794	838	965	1 016	1 143	3 648	3 658	3 962 × 7 620	1 778 × 4 572	1 778 × 4 674	4 877	5 791	5 335
140 000	1 270	1 524	2 540	3 048	1 829	2 134	3 353	3 658	1 067	1 270	1 143	1 372	4 556	4 572						

En este caso, el servicio queda asegurado por un pequeño grupo conversor alimentado por la baja tensión; con frecuencia se dispone además una pequeña batería de acumuladores que da la corriente para la maniobra y el alumbrado de socorro, durante una parada accidental.

Distancias entre líneas, entre línea y tierra, y entre cuernos de pararrayos.—Estas distancias están dadas por el cuadro de la página anterior:

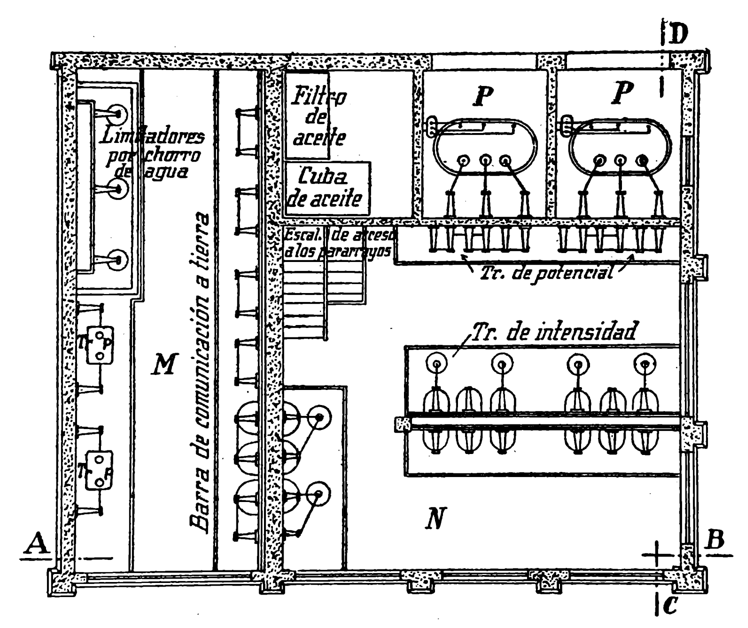
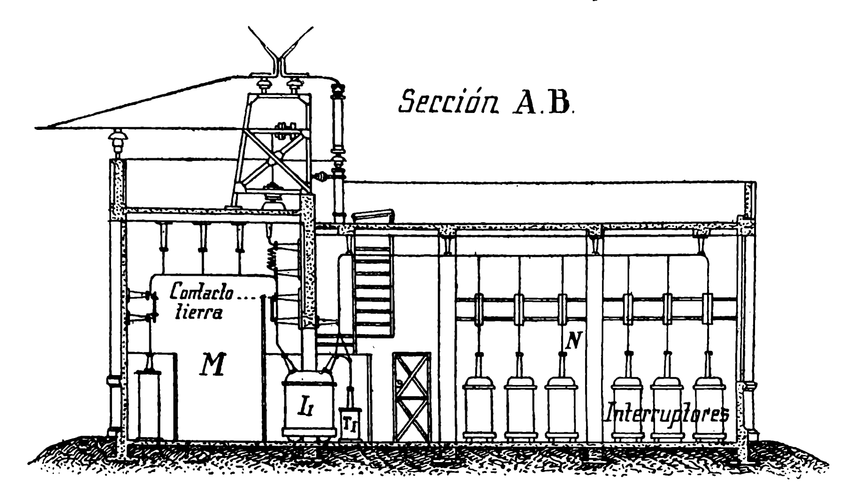
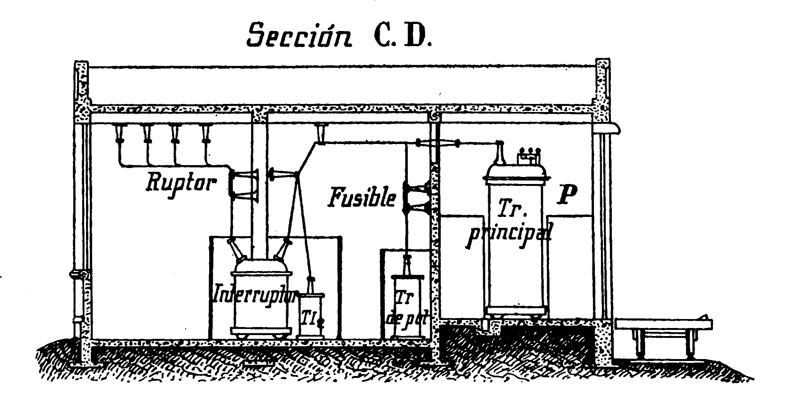


Fig. 130. — Planta de una estación reductora.

En esta tabla, las distancias se refieren a conductores desnudos; las superficies no comprenden los pasillos; los espacios ocupados por los pararrayos y los interruptores son aproximados; los interruptores se

han tomado los de espacio mínimo; los espacios de los pararrayos se entienden comprendidos los cuernos, por encima de la cuba para los pararrayos electrolíti-





Figs. 131 y 132. — Secciones de la estación anterior.

cos; para los otros pararrayos los espacios son más considerables. Las líneas en blanco de esta tabla corresponden a aparatos para los cuales los datos de

construcción son tan variables que es imposible dar ni siquiera una aproximación. Las distancias entre los dos cuernos de un pararrayos (distancia explosiva) varían con el estado de la atmósfera; como aproximación, se puede admitir 1 mm. por kilovolt

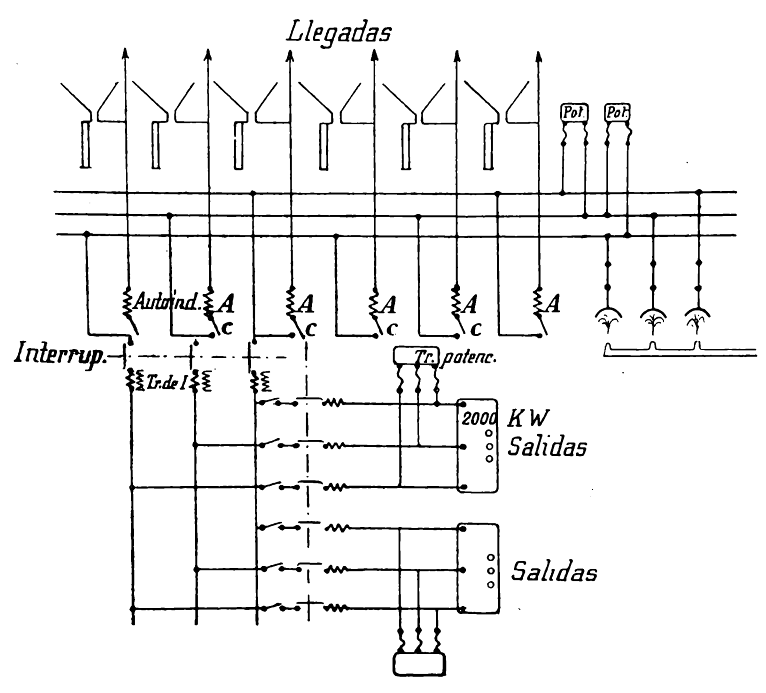


Fig. 133. — Esquema de conexiones de la estación anterior.

hasta 30000 volts, y 1,5 mm. por kilovolt por bajo de este valor.

Las figuras 130 a 133 se refieren a una estación de reducción de 50000 volts a 5000 volts, y de subdivisión.

La llegada de la alta tensión se hace sobre el techo por dos líneas de tres conductores, fijadas a un poste

que lleva los pararrayos y resistencias. En la sala de llegada *M* se encuentran: los ruptores y limitadores de tensión por chorro de agua; dos transformadores de potencial I_p monofásicos, protegidos por fusibles, que alimentan a los voltímetros.

El interruptor principal automático I_1 hace pasar la corriente por las barras de distribución a la sala *N*; este interruptor, como los dos interruptores de esta tensión de los transformadores, está en tres cubas. En la sala *N* están los dos transformadores de intensidad *TI* que alimentan a los wattímetros y contadores generales y al escape de máxima de I_1; dos interruptores de alta tensión cortan la corriente sobre cada uno de los transformadores principales. Entre interruptores y transformadores se encuentran dos transformadores de intensidad TI_2 que aseguran, con el transformador de potencial I_p la comprobación de cada uno de los transformadores principales. En la sala *PP* están los transformadores principales solamente.

Debajo de los transformadores hay dispuesto un sistema de rodadura para facilitar la revisión de los mismos; con una vagoneta se puede transportar el transformador bajo un aparato de desmontaje. Para la filtración y refinado del aceite, hay que habilitar un pequeño local adecuado.

CAPITULO IV

Transformación de corriente por rectificadores y transformadores giratorios

I.—Rectificadores

Los rectificadores pueden considerarse como transformadores estáticos que transforman la corriente alterna en continua. Su empleo está muy indicado para la carga de baterías de acumuladores de pequeña potencia, en una red alterna.

Rectificadores electrolíticos.—Estos aparatos están fundados en los fenómenos que se producen cuando una corriente atraviesa un electrolito alcalino entre dos electrodos, uno de los cuales es de aluminio.

Cuando el sentido de la corriente es tal que el aluminio es el anodo, es decir, cuando la corriente se dirige del aluminio hacia el otro electrodo, el oxígeno se deposita sobre el aluminio en forma de película aislante que interrumpe la corriente. Al contrario, cuando el sentido de la corriente es tal que el aluminio

es el catodo, no se opone ninguna resistencia a su paso (fig. 134).

Por consiguiente, un aparato de esta clase constituye, para la corriente alterna, una *válvula* que sólo

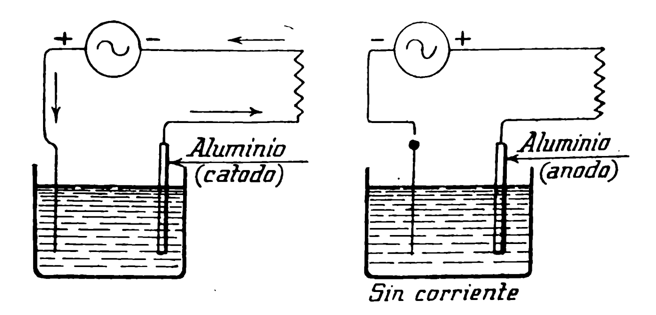


Fig. 134.

la deja pasar cuando está dirigida en cierto sentido; de este modo resulta una corriente discontinua, pero siempre del mismo sentido.

Se puede obtener una corriente continua por medio de cuatro válvulas montadas como indica la figura 135 en la cual los trazos más gruesos y largos representan los electrodos de aluminio.

Se ve que cualquiera que sea el sentido de la corriente producida por el alternador, el circuito *MN* es siempre recorrido por una corriente del mismo sentido. La carga de una batería de acumuladores sobre una red alterna se hace colocando dicha batería en *MN*, del modo indicado por la figura 136.

El electrolito consiste generalmente en borato de aluminio o en bicarbonato sódico, siendo cualquiera el otro electrodo distinto del de aluminio: hierro, plomo o carbón.

Los rectificadores electrolíticos se emplean con ventaja hasta los 3 amperes para todas las frecuencias

y para todas las tensiones hasta los 400 volts como máximo; la densidad de corriente admisible es aproximadamente de un ampere por decímetro cuadrado de la placa de aluminio. La temperatura del electrolito

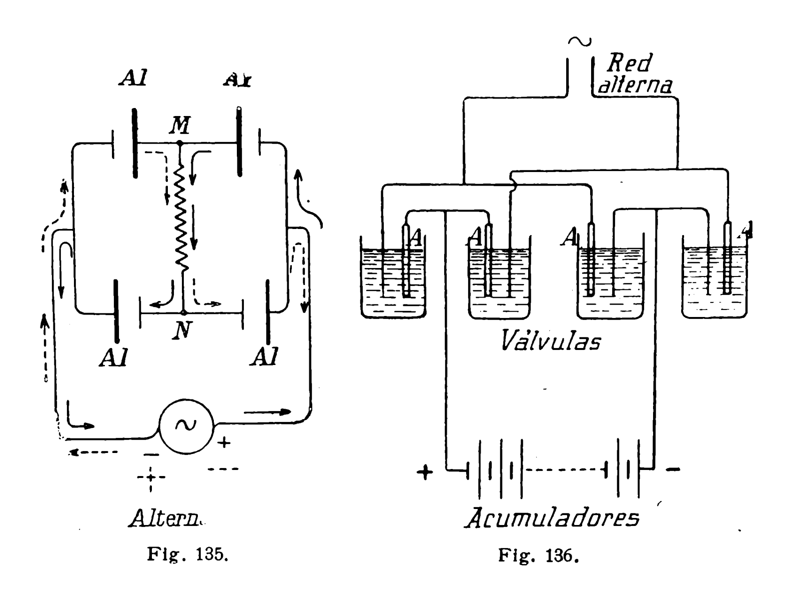


Fig. 135.

Fig. 136.

no debe pasar de los 40°, y la tensión continua rectificada es aproximadamente igual al 75 u 80 % de la tensión alterna eficaz, siendo el rendimiento de 75 %.

Rectificadores de vapor de mercurio.—Están constituídos estos rectificadores por lámparas de arco en el vacío, uno de cuyos electrodos es mercurio y el otro grafito; la corriente sólo puede pasar en el sentido carbón-mercurio. Para obtener la rectificación total para cada semiperíodo, se emplean lámparas de dos electrodos de carbón, como la representada en la figura 137, donde *C*, *C'* son los electrodos de carbón, *H* es el electrodo principal de mercurio, *H'* es un elec-

trodo de mercurio que sirve para el encendido de la lámpara. El electrodo H' comunica por fuera con C' por medio de una resistencia conveniente, de modo

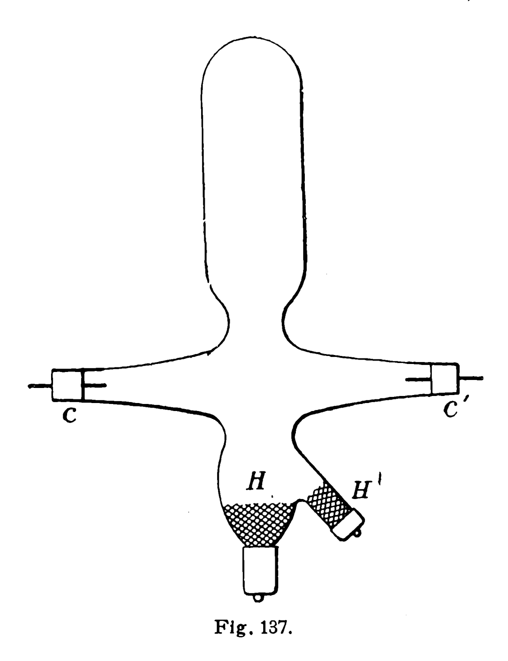


Fig. 137.

que inclinando el tubo, el mercurio de H' comunica con el de H y se forma el arco.

El montaje para la carga de una batería de acumuladores, por ejemplo, se hace como indica la figura 138.

El generador de corriente alterna se une a los dos bornes del transformador llamado *divisor de tensión* y a los dos anodos (carbón) del rectificador; el catodo (mercurio) H se une al polo + de la batería de acumuladores, cuyo polo — está conectado al medio del transformador T por intermedio de un carrete de autoinducción A_i en serie. Se ve que durante el semiperíodo

en que el conductor *A* del generador es + y *B* el polo —, la corriente tiene el sentido de la flecha de trazo continuo; durante el semiperíodo siguiente, la corriente tiene el sentido de la flecha dibujada de trazo discontinuo, y durante todo el período, y por lo tanto, de un modo continuo, la corriente atraviesa la batería de acumuladores en el mismo sentido.

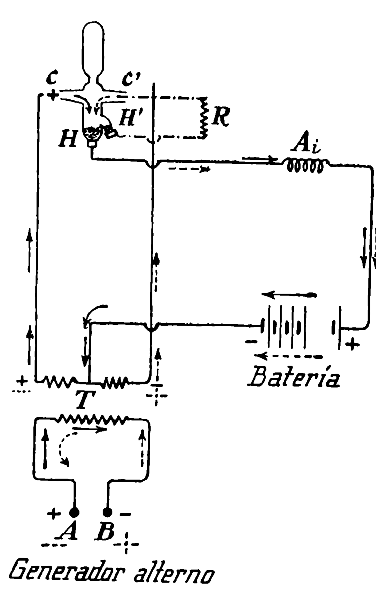


Fig. 138.

Para que se mantenga el arco es preciso que el electrodo de mercurio no se enfríe, lo cual tendría lugar cuando la tensión pasara por cero en el carrete de autoinducción A_i. Este carrete produce un retraso de la corriente respecto a la tensión, de modo que cuando la tensión alterna se hace nula, aún pasa una corriente de *C* a *H*, y cuando la corriente se anula, la tensión entre *C* y *H* tiene un valor suficiente para que el arco no se extinga a pesar del enfriamiento del mercurio.

Para rectificar la corriente trifásica, se utilizan aparatos de seis anodos y un sólo catodo. El divisor de tensión tiene un secundario de tres fases abiertas que dan una corriente exafásica, y los tres puntos medios están reunidos en un punto neutro que da el polo — del circuito continuo (fig. 139).

La tensión entre los electrodos es muy variable para una misma distancia; se puede hacer funcionar

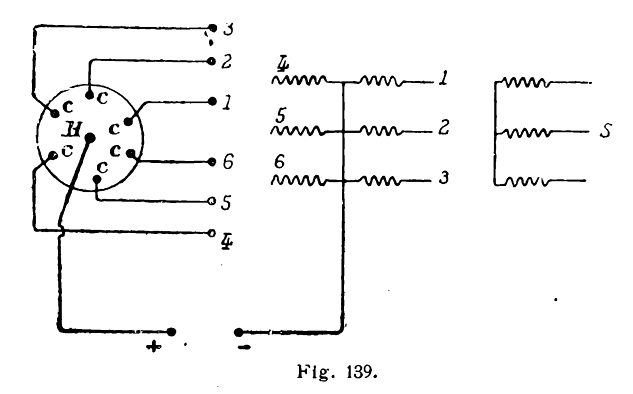


Fig. 139.

un rectificador de 65 a 650 volts para una frecuencia cualquiera. Actualmente se construyen rectificadores

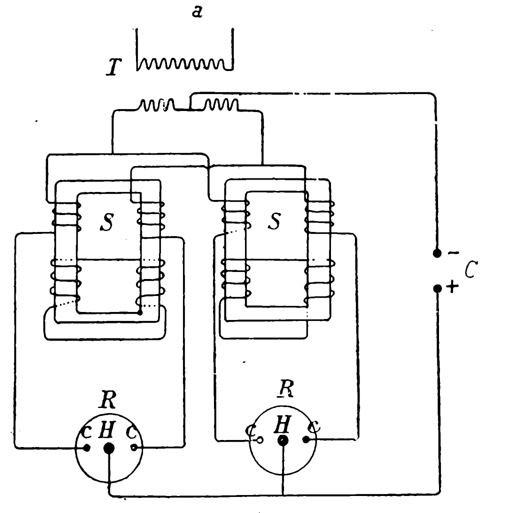


Fig. 140 (*a*, alternador; *C*, corriente continua).

hasta de 500 amperes; para intensidades superiores se montan varios aparatos en paralelo. La caída de ten-

sión en el vapor de mercurio es casi constante e igual a 16-18 volts para todas las tensiones, aumentando ligeramente con la carga; entre la tensión en vacío y la tensión a plena carga se puede apreciar una diferencia del 15 °/₀. En la figura 140 se ven dos rectificadores *R R* montados en paralelo; el carrete de autoinducción *SS* con algunas espiras en cortocircuito permite reducir la caída de tensión del 6 al 10 °/₀ entre las marchas en vacío y en carga; en se ve *T* el transformador.

El sistema Brown-Boveri (fig. 141), estudiado especialmente para las corrientes trifásicas, lleva un trans-

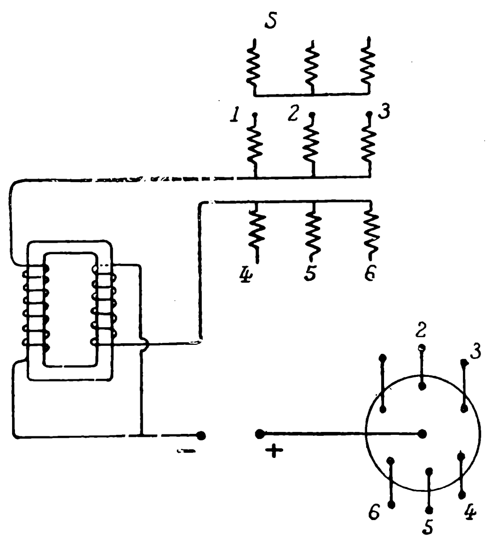


Fig. 141.

formador de seis carretes secundarios montados en estrella de tres en tres, estando unidos los dos puntos neutros entre sí a través de un carrete de reactancia. La caída de tensión del lado continuo nunca pasa con este sistema, del 2 al 3 °/₀.

La regulación de la tensión se hace, si es necesario, por tomas de corriente en el transformador.

II.—Transformadores giratorios

a) **Conversores de trifásica en continua.** — Un grupo conversor está formado por una generatriz de corriente continua movida por un motor asincrónico, siendo los dos circuitos del todo independientes.

El acoplamiento sólo presenta algunas dificultades de orden mecánico, encontrándose las dos máquinas ordinariamente sobre un mismo zócalo. Sin embargo, cuando un grupo conversor tiene volante, hay que tener un cuidado especial en la fijación y apoyo sobre la base.

El motor asincrónico tiene generalmente un reostato de arranque, pero puede ser de jaula de ardilla; en este caso puede haber precisión de emplear un dispositivo especial de arranque (autotransformador, estrella-triángulo, etc.) que no presenta dificultades de instalación. El esquema (fig. 142) corresponde a dos grupos trifásica-continua de 200 kilowatts, siendo los motores M de rotor devanado, y arranque por reostato R_d. La corriente de alimentación es trifásica a 6000 volts; las generatrices compound G pueden acoplarse en paralelo y la tensión continua es de 120 volts. El cuadro está formado de dos partes distintas: la caseta o cámara de 6000 volts comprende un dispositivo de protección, autoinducción S_e, pararrayos de cuernos S, y dos interruptores automáticos con escape de transmisión mecánica a distancia. Mediante ruptores de cuchillo S se puede poner bajo tensión todo o parte del cuadro. Un sólo transformador de tensión T_p

Las líneas de la izquierda son las de llegada; en la parte superior se ven las barras trifásicas B_t, y en la inferior las barras B_e de corriente continua a 120 volts; como se ve claramente en el esquema, las lámparas indicadoras L_f son alimentadas por el transformador de potencial T_p cuando el circuito está cerrado, y las otras lámparas L_o quedan alimentadas por el mismo transformador, cuando el circuito está abierto.

Fig. 142.

alimenta al voltímetro V y a las lámparas indicadoras de cierre L_f y apertura L_o. Tanto los disyuntores D_m (que son de máxima y de tiempo) como los de máxima D_{m2} son accionados por los transformadores de intensidad T_i.

El cuadro de distribución continua está por completo separado del de alta tensión. Los dos paneles del generador están provistos de relevador de retroceso de corriente R_e y de voltímetro V con conmutadores I_v para el acoplamiento.

En R, R, R se ven las resistencias en las líneas trifásicas B_t; E_d es la excitación shunt de G, E_s su excitación serie, R_h su reostato de campo y B_e las barras de corriente continua. A, A son los amperímetros y V, V los voltímetros; B es el carrete que hace funcionar a D_m; B' es un carrete de relevador; para las corrientes normales, B' no corta el contacto C, y B' está en cortocircuito; para una corriente excesiva en la línea, y por lo tanto en los secundarios de T_i, B' atrae a C al cabo de un cierto tiempo, y pasa una corriente por B, que obra sobre D_m abriéndolo. En f, f se ven los fusibles. T es una tierra.

b) **Conversor de continua en alterna.**—La transformación de corriente continua en alterna es poco frecuente y se hace ordinariamente con una conmutatriz.

Sin embargo, se puede utilizar un grupo de motor continuo y alternador. En este caso, el motor se calcula para variaciones mínimas de velocidad; un reostato de campo permite ajustar la velocidad a un valor correspondiente a la frecuencia pedida. El grupo está provisto de un dispositivo centrífugo de contacto, que hace abrirse al disyuntor del motor para una velocidad excesiva accidental. La excitación del alternador se toma sobre la red continua.

III.—Conmutatrices [1]

Las conmutatrices se utilizan indiferentemente para la transformación de la corriente continua en alterna o al contrario, de alterna en continua, pero este último caso es el más frecuente.

Las conmutatrices con dos anillas, *monofásica-continua,* se emplean poco; las tomas de corriente se hacen a 180° para una máquina de dos polos, y la relación de transformación es:

$$\frac{E \text{ alterna}}{E \text{ continua}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707.$$

Las conmutatrices que transforman la corriente *bifásica en continua* tienen cuatro anillas conectadas a cuatro puntos del devanado inducido, distantes entre sí 90°. El orden de las anillas se toma frecuentemente de tal modo que haya que derivar las anillas 1 y 3 sobre una fase, y las 2 y 4 sobre la otra.

La relación de transformación es:

$$\frac{E \text{ alterna}}{E \text{ continua}} = \frac{1}{2} = 0{,}5.$$

La transformación de la corriente *trifásica en continua* se hace con máquinas de 6 anillas y con máquinas de 3 anillas. Las primeras son las más empleadas por dar una mejor utilización del devanado inducido y aumentar la potencia másica en la relación de 1,4 a 2 aproximadamente.

En las conmutatrices con tres anillas, éstas van

[1] Véase el tomo III, MÁQUINAS ELÉCTRICAS, cap. XII.

unidas a tres puntos del devanado inducido distantes entre sí 120°. La relación de transformación es:

$$\frac{E \text{ continua}}{E \text{ entre anillas}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0{,}61.$$

Las anillas de las conmutatrices de 6 anillas están conectadas a seis puntos del devanado distantes entre sí 60°. Las anillas pueden unirse al transformador de

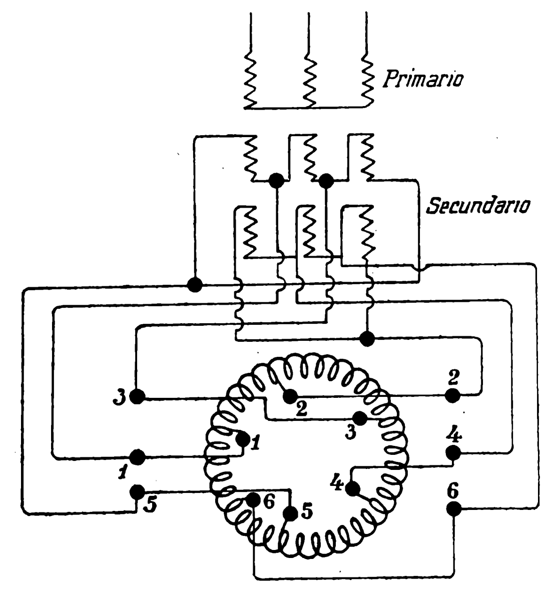


Fig. 143.

dos modos: 1.° por conexiones en doble triángulo; 2.° por conexiones diametrales. El montaje en doble triángulo requiere la división en dos partes iguales del devanado del transformador; tres semicolumnas (cada columna corresponde a una fase del sistema trifásico), van unidas en triángulo y los tres puntos de contacto

se unen a las anillas 1, 3, 5, enumeradas por orden natural; las otras tres semicolumnas, también agrupadas en triángulo, se unen a las anillas 2, 4, 6. Para que las dos mitades del devanado no estén en oposición, hay que hacer las conexiones en el orden siguiente: las anillas 1 y 3, 4 y 6 deben corresponder a la misma fase, y las 3-5 y 2-6 a la segunda, y las 5-1 y 2-4 a la tercera (fig. 143).

La relación de transformación es para este montaje la misma que con una conmutatriz de tres anillas:

$$\frac{E \text{ continua}}{E \text{ entre fases}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0{,}61.$$

Cada semicolumna del transformador está sometida al voltaje total, 0,61 E continua.

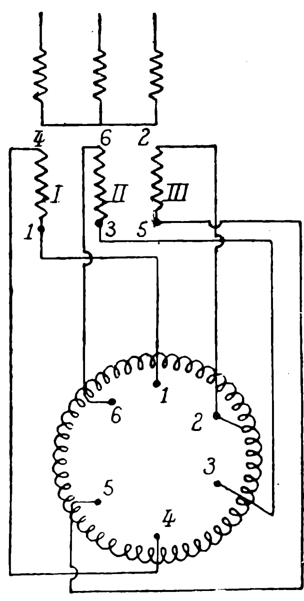


Fig. 144.

El *montaje diametral*, que se emplea más que el de doble triángulo, consiste en unir los dos extremos de cada fase abierta del transformador con las anillas en el orden siguiente: fase I, anillas 1-4; fase II, anillas 3-6; fase III, anillas 5-2 (fig. 144). Al hacer las conexiones, para evitar todo error en el sentido de las mismas, hay que seguir con todo cuidado el orden siguiente: para un sentido dado del devanado del transformador, los principios de los carretes deben unirse a las anillas 1, 3, 5, y los terminales de los carretes respectivamente a las anillas 4, 6, 2.

La relación de transformación con la conexión diametral es, para una fase, la misma que en el caso de corriente monofásica:

$$\frac{E \text{ continua}}{E \text{ entre fases}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}70 \text{ aproximadamente.}$$

Arranque de las conmutatrices.—Los aparatos anejos a una conmutatriz están determinados por el procedimiento empleado para el arranque, y los circuitos de alimentación se hacen funcionar del modo normal en todas las generatrices.

a) *Arranque por la corriente continua.* — Una conmutatriz trabaja generalmente, sea del lado continuo, o del lado alterno, en paralelo sobre una red de distribución independiente. En este caso se dispone el sistema de arranque para funcionar por una toma de corriente de esta red. El dispositivo más sencillo es el arranque por corriente continua.

La excitación de la conmutatriz es entonces independiente; entra en juego mediante un interruptor-inversor bipolar y es regulada por un reostato de campo. El circuito de inducido, regido por un disyuntor y un interruptor de mano, comprende un reostato de arranque poco voluminoso, puesto que el arranque se hace siempre de vacío. Este reostato puede ponerse en cortocircuito con un interruptor. El reostato de campo sirve para hacer adquirir a la máquina la velocidad correspondiente a la frecuencia. El acoplamiento sobre el circuito de corriente alterna se hace preferentemente por el primario del transformador, mediante aparatos ordinarios: indicador de sincronismo y lámparas de fase (fig. 145).

El circuito trifásico primario permite un acoplamiento más fácil, porque sólo hay que unir tres con-

ductores, mientras que el secundario tiene seis en las conmutatrices normales.

Al arrancar hay que cerciorarse de que el circuito de las anillas está bien abierto, pues la resistencia

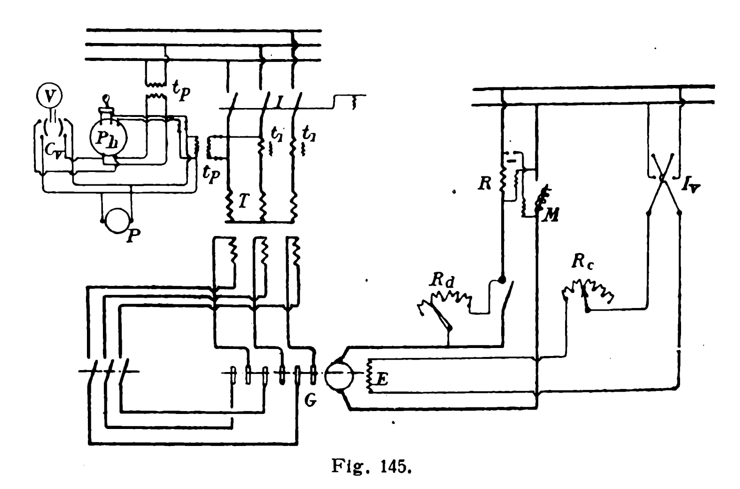


Fig. 145.

óhmica del transformador es muy pequeña y deriva la corriente del inducido; basta para ello el corte unipolar sobre cada fase. El circuito se cierra de nuevo después de cada arranque, para poder hacer el acoplamiento.

El relevador de retroceso o vuelta de corriente que produce la apertura del circuito de corriente continua, está regulado para no funcionar con la corriente de arranque.

El disyuntor del lado continuo es maniobrado, aparte de su relevador, por un contacto de fuerza centrífuga colocado en el extremo del árbol.

b) *Arranque por la corriente alterna.*—Las conmutatrices de corriente monofásica no arrancan nunca del lado alterno; únicamente se las puede poner en marcha por la corriente continua.

Para los arranques de las conmutatrices de corrientes polifásicas, se cierra el circuito sobre las anillas, no estando excitados los inductores.

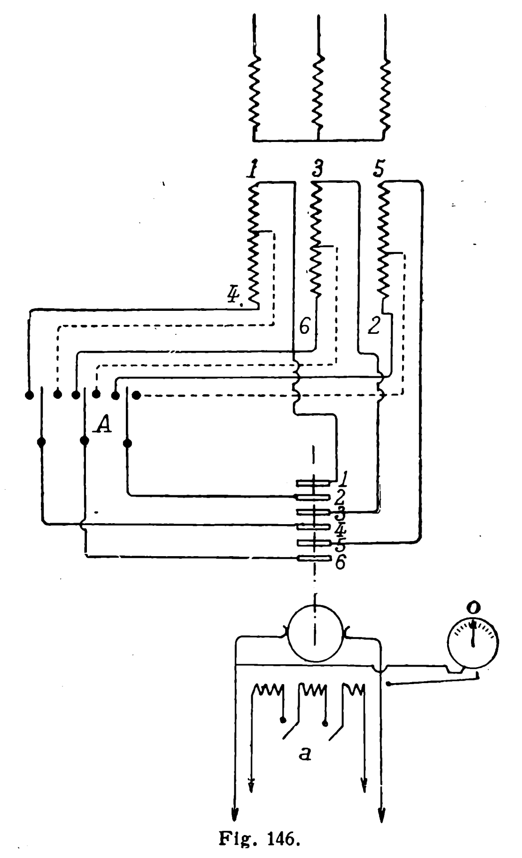


Fig. 146.

El circuito magnético y los amortiguadores dan a la máquina cierta semejanza con un motor asincrónico de jaula de ardilla, con lo cual se puede lograr el arranque. Para evitar que en el circuito inductor se produzca una tensión excesiva, se puede dividir este circuito en varias secciones perfectamente aisladas *a*

(fig. 146). El interruptor multipolar empleado para este fin se cierra cuando la máquina llega al sincronismo; de este modo se puede cerrar el circuito inductor sobre una resistencia elevada para que no haya entre los bornes del inductor sino una tensión reducida. Pero no se pueden poner los bornes en cortocircuito, porque las resistencias óhmicas del devanado fijo deben ser suficientes para obtener un par conveniente en el arranque. Lo que se hace es sencillamente cerrar el circuito inductor sobre las escobillas; la superposición de las fuerzas electromotrices inducidas en el circuito fijo y en el móvil no produce ninguna diferencia de potencial peligrosa para el aislamiento. En *A* se ve el conmutador de arranque a tensión reducida.

Si se cierra sobre las anillas el circuito de voltaje total, se produce un *golpe* de corriente, excesivo y peligroso. Para evitar este inconveniente, se emplean interruptores de dos direcciones que permiten el arranque en dos tiempos; el primer tiempo pone bajo tensión reducida (un tercio de la normal aproximadamente) las anillas que en el segundo tiempo se ponen rápidamente bajo la tensión normal.

Mientras dura el período de arranque, la tensión en las escobillas es alterna, siendo su frecuencia igual al resbalamiento; cuando la conmutatriz se acerca al sincronismo, la polaridad del lado continuo se invierte a intervalos de varios segundos y la frecuencia correspondiente, llamada *constante de tiempo* de la conmutatriz, está determinada por las características de amortiguamiento de la máquina.

Mediante un voltímetro polarizado de dos direcciones *O* se observan las oscilaciones de tensión en las escobillas, y en el instante en que la tensión es máxima en el sentido pedido, se cierra el circuito inductor con un sentido conveniente de corriente. Este sentido de la

corriente inductora debe ser aquel que determinaría el sentido de rotación si la corriente continua alimentara a la conmutatriz funcionando como motor.

Incidentes en el arranque.—1.° Puede suceder que la conmutatriz esté en fase con la tensión de polaridad inversa en el colector. Para remediar este inconveniente, se abre otra vez el circuito inductor sin interrumpir la corriente alterna; de este modo se restablece el funcionamiento asincrónico, y se espera a que el inducido haya resbalado un polo, lo cual se conoce en que el voltímetro acusa una desviación en el sentido conveniente; cerrando entonces el circuito inductor, la máquina vuelve a funcionar sincrónicamente para el buen sentido de la corriente del lado continuo.

2.° A veces se observa, sobre todo cuando la tensión de alimentación no es de forma sinusoidal, una concordancia de fase a una velocidad igual a la mitad de la del sincronismo, lo cual depende generalmente de un exceso accidental de la resistencia óhmica del circuito amortiguador (mal contacto, por ejemplo). En este caso, después de haber revisado los amortiguadores, se debe cerrar el circuito inductor sobre el inducido, o sobre una pequeña resistencia, en lugar de cortarlo para el arranque; de este modo no debe volverse a estabilizar la semivelocidad del sincronismo.

3.° Cuando los carbones son poco resistentes, y en particular cuando cubren más de dos láminas en el colector, el arranque produce chispas ruidosas y muy largas que pueden dar lugar a la formación de arco entre las escobillas. Si se puede arrancar con el inductor abierto, quizás haya necesidad de disponer un sistema de elevación de los carbones; las escobillas se apoyan entonces sobre el colector en cuanto la velocidad se acerca a la de sincronismo. Cuando la longitud

del colector lo permite, es mucho más sencillo disminuir la anchura de los carbones y aumentar su

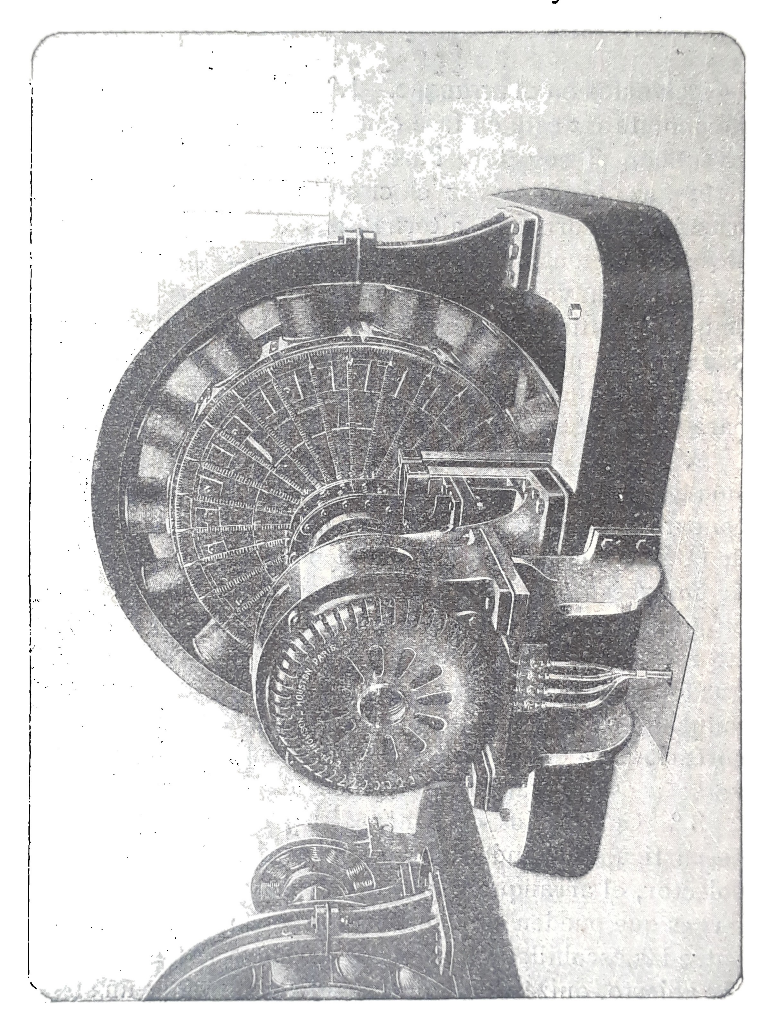


Fig. 147.

número para que no resulte modificada la densidad de corriente.

Arranque con un motor auxiliar.—Para las conmutatrices de gran potencia que no pueden arrancar como motor de corriente continua, el *golpe* en el arranque como asincrónico es violento, y se prefiere utilizar un motor auxiliar para el arranque. Este motor se acopla sobre el extremo del árbol, y es asincrónico de rotor devanado (fig. 147); su número de polos le permite alcanzar la velocidad de sincronismo de la conmutatriz, y con un reostato se asegura el arranque progresivo.

Cuando la velocidad normal parece alcanzada, se excita la conmutatriz y se acopla sobre el circuito continuo por el voltímetro de acoplamiento. El motor de arranque se pone fuera de circuito, y mediante el reostato de excitación de la conmutatriz se ajusta la velocidad para el acoplamiento con el sincronoscopio del lado alterno. Si no hay más generatriz de corriente continua que la conmutatriz, se autoexcita en cuanto llega a una velocidad próxima a la del sincronismo, y se acopla con el sincronoscopio sobre la red alterna.

Inversión de marcha. — Para invertir el sentido de rotación de una conmutatriz, no sólo hay que invertir el sentido de la corriente de excitación, sino también hacer la permutación de dos fases.

Regulación de la tensión [1]. — Para conseguir una buena regulación práctica de la tensión, se hace lo siguiente.

1.° Se dispone sobre los inductores un compoundado análogo al de una generatriz de corriente continua y sobre el circuito de las anillas se intercala en serie en cada fase un carrete de autoinducción o self. (fig. 148).

(1) Tomo III, MÁQUINAS ELÉCTRICAS, pág. 280.

Cuando hay varias conmutatrices compound que tienen que funcionar en paralelo, el cuadro tiene una barra de equilibrio; cada máquina tiene su interruptor de equilibrio y un disyuntor de retroceso de corriente; un limitador de velocidad hace funcionar al disyuntor.

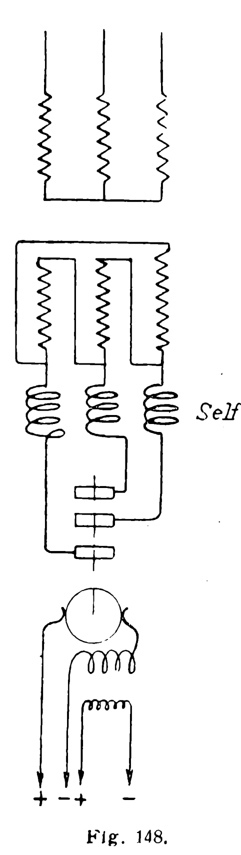


Fig. 148.

Para el arranque en asincrónico de una conmutatriz compound, hay que hacer el corte bipolar del circuito de compoundado de modo que el circuito no pueda cerrarse sobre el compoundado de una máquina cercana o sobre una resistencia cualquiera de regulación, pues entonces obraría como un devanado en cortocircuito y haría disminuir el par de arranque.

El reostato de campo no debe servir, en marcha normal, más que para regular la excitación para el cos φ pedido, que se comprueba con un fasímetro.

2.° *Elevador de tensión.*— Se puede intercalar en serie en el circuito de las anillas un elevador de tensión que regula la tensión entre grandes límites. El elevador puede ser del tipo estático con regulación por corrimiento de los devanados [1]. Los carretes inductores están derivados sobre el transformador (fig. 149).

El elevador de tensión puede ser también un alter-

[1] Tomo IV, INSTALACIONES INTERIORES, pág. 279.

nador de fases abiertas, de excitación variable; cada una de sus fases se pone en serie sobre una fase del transformador de alimentación. Para que la frecuencia sea exactamente la misma, es preciso acoplar este

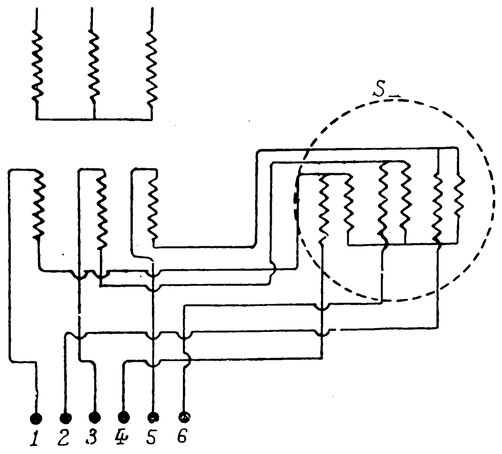


Fig. 149 (S, elevador de tensión).

elevador de tensión sobre el mismo árbol de la conmutatriz y darle el mismo número de polos que ésta. Las variaciones de tensión se obtienen mediante un reostato montado sobre la excitación.

Para no tener ningún defasaje entre las dos tensiones, las líneas de fuerza de los campos en las dos máquinas, conmutatriz y elevador de tensión, deben estar en el mismo plano para cada polo, condición que hay que tener en cuenta en el montaje.

Para ciertas disposiciones de funcionamiento, como, por ejemplo, en la carga de acumuladores, se prefiere obtener una regulación de la tensión fuera de la conmutatriz; en este caso se coloca en serie sobre el circuito continuo cuya tensión hay que elevar, el inducido de un elevador normal de tensión de corriente conti-

nua, que obre sobre toda o parte de la distribución. Este elevador puede montarse sobre el árbol de la conmutatriz.

Conmutación de las conmutatrices. Polos auxiliares.—Una conmutatriz puede considerarse como una máquina que fuera a la vez motor y generador de igual potencia con una aproximación igual al rendimiento. Por consiguiente, esta máquina habría de tener una reacción nula de inducido y el campo magnético no debería tener ninguna distorsión. Sin embargo, como explica el Sr. Picou (Bulletin S. I. E. 13 noviembre) y como, desde luego, comprueba la observación, existe en la zona de conmutación un campo de reactancia.

La curva de distribución de las tensiones en el colector, trazada como ya dijimos para las máquinas de corriente continua, demuestra efectivamente que existen varios ceros de desvío en la zona de las escobillas. Mejor que procurar desviar las escobillas, es modificar la forma de las piezas polares, si la máquina no tiene polos auxiliares. Una excelente medida consiste en cerrar un circuito amortiguador en el espacio interpolar; este circuito absorbe las variaciones del campo local en la zona de conmutación.

Para el ajuste de la conmutación de una conmutatriz de polos auxiliares se obra sobre los amperes-vuelta, el entrehierro y la expansión polar de los polos auxiliares (forma y dimensiones). La curva del colector indica, parte por parte, las modificaciones que hay que hacer.

Aplicación de una conmutatriz a la excitación de un alternador asincrónico.—En el tomo IV, «Instalaciones interiores», página 286, vimos que un motor asincrónico puede funcionar como generador, si el rotor

gira con una velocidad angular ω' superior a la pulsación de la corriente en el estator ω cuando la máquina es de dos polos, y superior a $\frac{\omega}{p}$ si es de $2p$ polos. Este alternador debe recibir de un generador la corriente

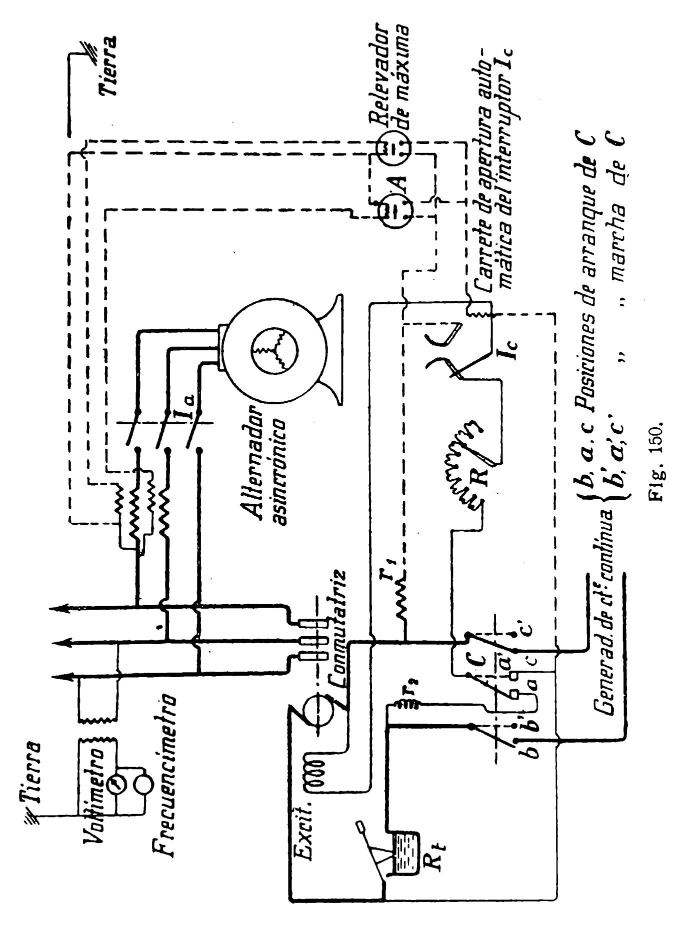


Fig. 150.

magnetizante, y para ello se puede recurrir a una conmutatriz. El montaje es el indicado por la figura 150.

El rotor del alternador está en cortocircuito; para el arranque es necesario alimentar el estator. Para ello se mueve la conmutatriz valiéndose de un generador auxiliar de corriente continua, por intermedio del conmutador de dos direcciones *C*. Al arrancar, todos los interruptores de la distribución trifásica, incluso los I_a, están abiertos; el conmutador *C* está en la posición de arranque, y el interruptor I_c en la posición de marcha.

El arranque se hace con el reostato líquido R_l hasta alcanzar para la conmutatriz una velocidad muy próxima a la del sincronismo. La máquina que mueve al generador asincrónico se pone en marcha, y en cuando alcanza su velocidad, se cierra I_a. No es preciso llegar a un valor exacto de esta velocidad.

Entonces se corre de pronto y a fondo el conmutador tripolar, con lo cual se obtiene la autoexcitación.

La resistencia adicional r_1, dispuesta para compensar la diferencia de tensión en los bornes de los inductores al cambiar de marcha, de motor en generador, y que al arrancar estaba en serie con el inductor, está ahora fuera de circuito. Los contactos *a*, destinados a los hilos de excitación, están todo lo cerca unos de otros que lo permite la tensión, pues el contacto móvil debe pasar de uno a otro sin que haya interrupción, pero no debe alcanzar al contacto de marcha normal sino cuando se ha roto el contacto con *b* y *c*.

La regulación de la tensión alterna se hace mediante el reostato de excitación *R*. El interruptor I_c de excitación es automático y accionado por los relevadores amperimétricos *A*. Cuando se quiere parar el alternador, basta maniobrar el interruptor I_c que cierra los inductores sobre la resistencia r_2. El reostato de arranque se lleva, como es natural, a la posición de apertura o corte.

El montaje puede aplicarse a instalaciones provisionales o de prueba.

Conversores de frecuencia. – Actualmente, los pocos transformadores de frecuencia que se utilizan en la industria son grupos reversibles formados por dos alternadores sincrónicos de distinto número de polos, acoplados, y que pueden ser tan pronto motores como generadores, según las necesidades de la utilización.

Un grupo conversor de 50 a 40 periodos, por ejemplo, podrá comprender un alternador de 10 polos del lado de los 50 periodos, y un alternador de 8 polos del lado de los 40 periodos, con un sincronismo de 600 vueltas $\left(N = \frac{60\,F}{p}\right)$.

La excitación se obtiene con una excitatriz colocada en el extremo del árbol o con un generador independiente. El arranque se hace mediante un motor de lanzamiento que puede alimentarse por corriente continua o trifásica, según las disposiciones de la distribución.

El acoplamiento se hace sobre una de las redes por los dispositivos ordinarios. Si hay que acoplar a la vez sobre dos redes (una de cada frecuencia), hay que poder desviar uno de los dos estatores. En efecto, los dos rotores, por su unión mecánica forman una sola pieza; por consiguiente, si cuando se ha conseguido la concordancia en una de las redes, el rotor que no está acoplado está en retraso o en adelanto en una fracción de periodo, el acoplamiento no es realizable, a pesar del sincronismo; por lo tanto, ha de poderse correr uno de los estatores respecto al otro en un espacio polar aproximadamente. Este ajuste de fases se comprueba con el sincronoscopio. Durante la marcha, la excitación es

regulada para un cosφ conveniente, medido con el fasímetro.

No hay que modificar el desvío del estator móvil después de hecho el acoplamiento sobre las dos redes; por otra parte, el par de reacción durante la carga se opondría a toda maniobra.

El esquema de la figura 152 representa el montaje de un grupo que transforma la corriente trifásica de 2500 volts y 50 periodos en otra trifásica de 2500 volts y 40 periodos. Los dos alternadores, el motor de arranque y la excitatriz están sobre un mismo zócalo.

Transformadores de fase.—Estos aparatos, destinados a transformar la corriente bifásica en trifásica, o trifásica en monofásica, o al contrario, son generalmente combinaciones de transformadores estáticos.

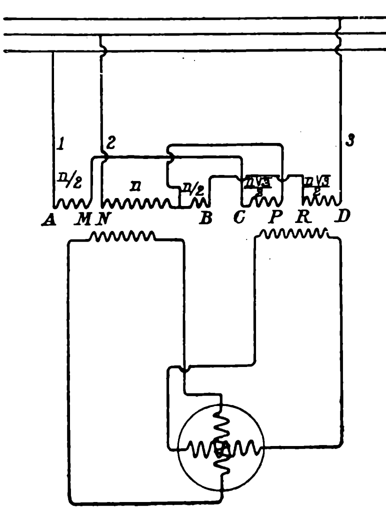


Fig. 151.

Las dos combinaciones utilizadas en la práctica son las que siguen:

I. —*La transformación Scott,* de bifásica en trifásica, obtenida como indica el esquema de la figura 151.

En efecto, las fuerzas electromotrices inducidas en los dos devanados *AB* y *CD* están defasadas entre sí 90°.

Si *E* es la f. e. m. eficaz inducida en las *n* espiras de

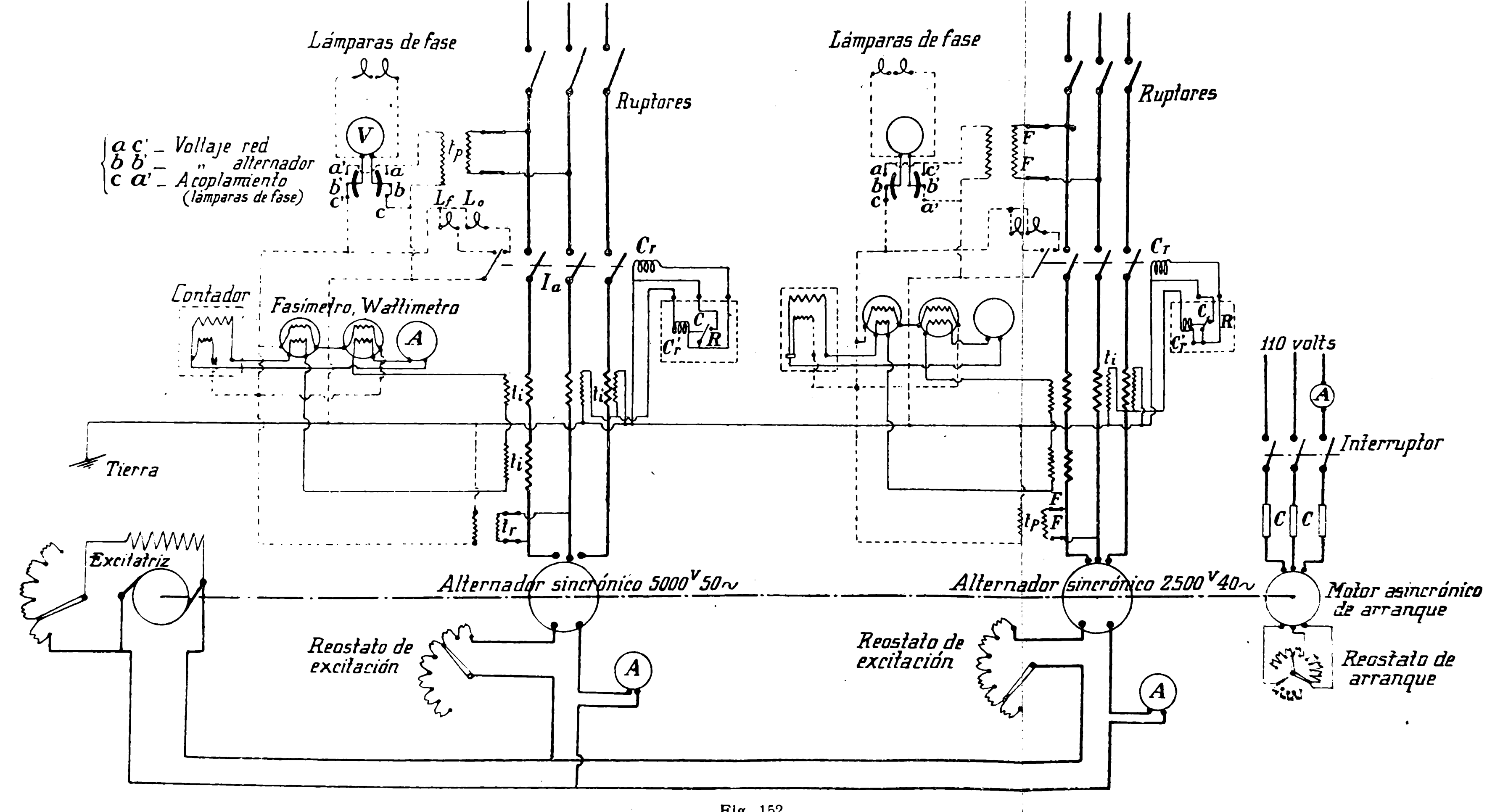

Lámparas de fase
Ruptores
Lámparas de fase
Ruptores
a c' – Voltaje red
b b' – " alternador
c a' – Acoplamiento
(lámparas de fase)
Contador
Fasímetro, Wattímetro
Tierra
Excitatriz
Alternador sincrónico 5000 V 50~
Alternador sincrónico 2500 V 40~
Reostato de excitación
Reostato de excitación
110 volts
Interruptor
Motor asincrónico de arranque
Reostato de arranque

Fig. 152.

cada uno de los dos devanados secundarios, se tiene: 1.° entre A y M:

$$\frac{n}{2} \text{ espiras; fuerza electromotriz: } \frac{E}{2} \text{ volts;}$$

entre C y P:

$$\frac{n\sqrt{3}}{2} \text{ espiras; fuerza electromotriz: } \frac{E\sqrt{3}}{2} \text{ volts;}$$

por consiguiente, entre A y O, E_1 volts, tales que:

$$E_1^2 = \frac{E^2}{4} + \frac{3E^2}{4} = E^2$$

por lo tanto:

$$E_1 = E;$$

2.° entre N y O, n espiras:

$$E_2 = E;$$

3.° entre O y B:

$$\frac{n}{2} \text{ espiras; fuerza electromotriz: } \frac{E}{2} \text{ volts;}$$

entre D y R:

$$\frac{n\sqrt{3}}{2} \text{ espiras; fuerza electromotriz: } \frac{E\sqrt{3}}{2} \text{ volts;}$$

luego entre D y O, E_3, tal que:

$$E_3^2 = \frac{E^2}{4} + \frac{3E^2}{4} = E^2; \quad E_3 = E.$$

Es decir, que entre cada uno de los tres puntos A, N, D y el punto neutro O hay la misma fuerza electromotriz E, y además, como se ve en el diagrama de

la figura 153, estas tres tensiones E_1, E_2, E_3 están defasadas una sobre otra 120°.

II. — *La transformación de trifásica en monofásica,* empleada en las instalaciones de tracción

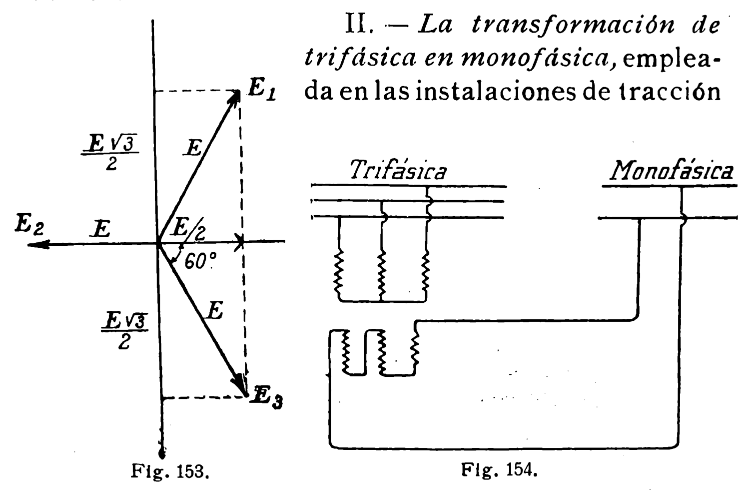


Fig. 153. Fig. 154.

para utilizar directamente los motores monofásicos por

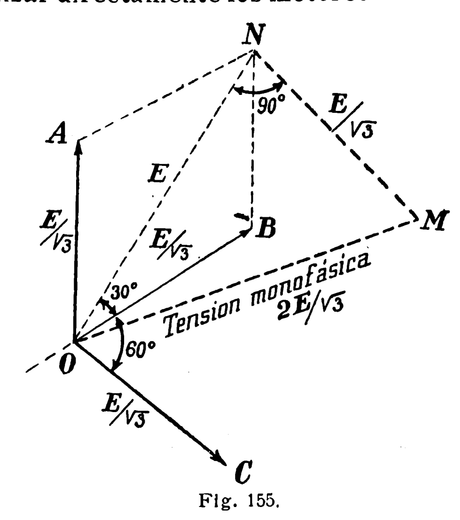


Fig. 155.

medio de una distribución trifásica. Los tres devanados del secundario de un transformador trifásico están

unidos en serie, conservando dos fases su sentido normal y la tercera invertido (fig. 154).

Si E es la tensión compuesta entre los bornes del secundario cuando está montado en estrella, la tensión monofásica es $\frac{2E}{\sqrt{3}}$, como se ve en el diagrama de la figura 155, donde OA y OC representan las tensiones en estrella de dos fases secundarias, OB la tensión en la tercera fase, cuyo devanado se ha invertido, siendo la resultante OM. Se ve que

$$ON = \frac{E}{\sqrt{3}} \sqrt{3} = E,$$

y que el triángulo OMN es rectángulo en N, por lo cual:

$$OM^2 = ON^2 + NM^2 = E^2 + \frac{E^2}{3} = \frac{4E^2}{3},$$

o sea, finalmente:

$$OM = \frac{2E}{\sqrt{3}} = 1{,}154\ E.$$

CAPÍTULO V

Redes subterráneas

Los cables subterráneos están formados de tres partes:

1.ª El o los conductores, constituídos por cordones de cobre de 7 ó 19 ó 37 hilos según la sección total que deban tener. Estos hilos o ramales están estañados

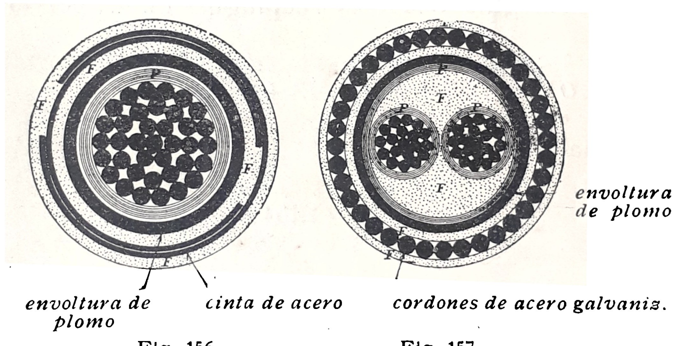


Fig. 156. Fig. 157.

para preservarlos de la acción química de los aislantes con que han de estar en contacto.

2.ª Los aislantes, en los cuales van alojados separadamente los conductores, y que están constituídos por papel impregnado en una sustancia aisladora.

3.ª La cubierta protectora, formada a su vez de dos partes: la primera consistente en una o dos cubiertas de plomo de 3 a 4 milímetros de espesor formando una vaina continua que protege al cable contra la hume-

dad del suelo; la segunda parte consiste en dos tiras de acero que protegen al cable mecánicamente contra las roturas de la vaina de plomo y de las capas aisladoras al poner el cable, y que protegen a la vaina de plomo contra la electrolisis y las acciones químicas (figs. 156, 157, 158).

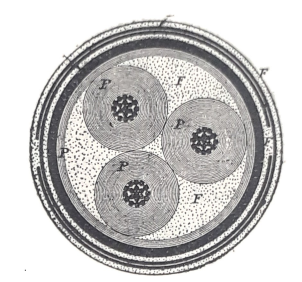


Fig. 158.

Colocación de los cables. — Los cables se colocan en zanjas de 75 cm. cuando menos, de profundidad, en cuyo fondo se extiende una capa de arena, para absorber el agua.

Estos cables, que están arrollados sobre carretes, en trozos de 50 a 500 metros, según su diámetro, se estiran en toda su longitud, haciendo girar a los carretes. Esta operación debe hacerse del modo siguiente: los obreros que hagan el trabajo se colocan a unos 5 metros de distancia unos de otros, levantan el cable a una señal del capataz y avanzan por la zanja, y a una nueva señal lo dejan en el suelo sobre un ladrillo que cada obrero debe llevar consigo. Después, y a otra señal, vuelven a levantar el cable, avanzan y lo dejan otra vez sobre el suelo, y así sucesivamente.

Una vez colocado el cable, se cubre con una capa de arena y se protege con una rejilla, poniendo encima tejas o simplemente pedazos de ladrillos que indicarán la existencia del cable cuando haya que hacer trabajos sobre la parte de terreno en que se encuentra.

En las calles estrechas y en los barrios de las ciudades de gran densidad de población, hay necesidad de poner muchos cables en una misma zanja. En este caso resulta cómodo colocar los cables en tuberías de gres

o de barro, o en conductos de madera que se llenan con asfalto después de colocado el cable.

Paso del cable a través de una vía férrea. — Para atravesar un vía de ferrocarril, hay necesidad casi siempre de recurrir a una obra de fábrica (puente de paso por encima o por debajo de la vía). En este caso, se toman las precauciones necesarias para que la línea no pueda tocar con ningún órgano metálico de la obra de fábrica. En la imposibilidad de hacer un puente, se hace pasar la línea por debajo de la vía; los cables se colocan en conductos enterrados a 70 centímetros cuando menos por bajo del nivel de la plataforma de la vía. Los conductos se prolongan a una y otra parte de la vía de modo que se pueda sacar el cable o cambiarlo por otro sin que haya que cavar en la vía.

Una línea subterránea que una o enlace a otras dos aéreas, no debe salir del suelo a menos de tres metros de distancia de la vía.

Sección de los cables. — Las secciones de los cables subterráneos están dadas por la tabla siguiente:

Intensidades permanentes normales, en amperes .	6	10	15	20	25	35	60	80	100	125	160	190	225	260	300	360	450
Intensidades permanentes máximas, en amperes.	11	14	20	25	31	43	75	100	125	160	200	240	280	325	380	450	540
Sección de los cables, en milímetros cuadrados. .	1	1,5	2,5	4	6	10	15	25	35	50	70	95	120	150	185	240	310

Como sección útil de un cable cuyo diámetro aparente de cobre es D, se puede admitir el siguiente valor:

$$S = 0{,}75 \frac{\pi D^2}{4}.$$

Empalmes y derivaciones. — Los empalmes y las derivaciones o ramificaciones se hacen en los conductores por medio de uniones directas o bridas alojadas

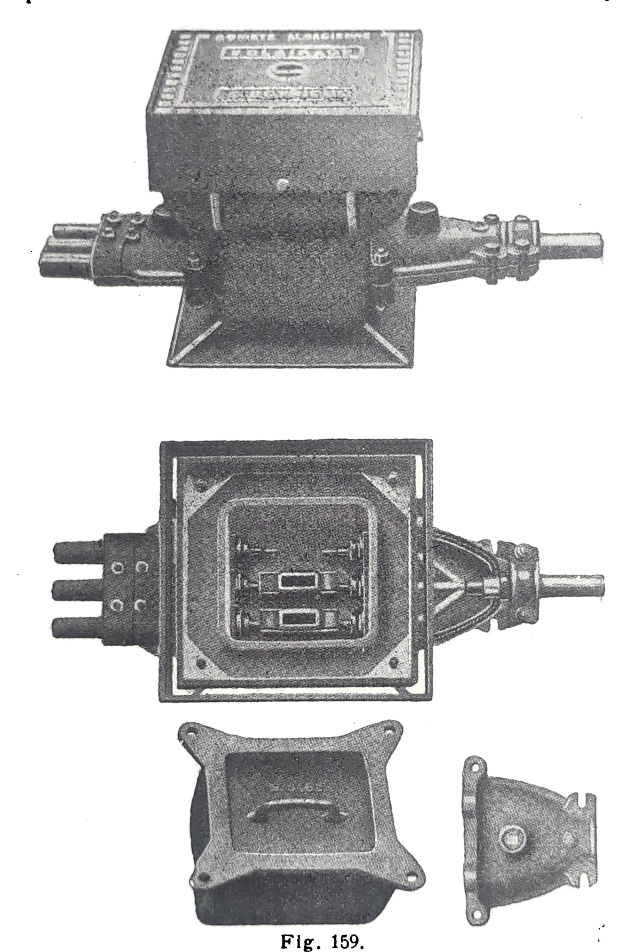


Fig. 159.

dentro de manguitos que se llenan de materia aislante; estos manguitos se cierran herméticamente con un cordón ensebado alojado en una ranura (fig. 159).

Las derivaciones para los edificios se toman de la línea subterránea mediante cajas provistas de cortocircuito, colocadas en las paredes (figura 160) o bajo el suelo (fig. 161), y encerradas en una caja mayor, que permita la revisión de la toma.

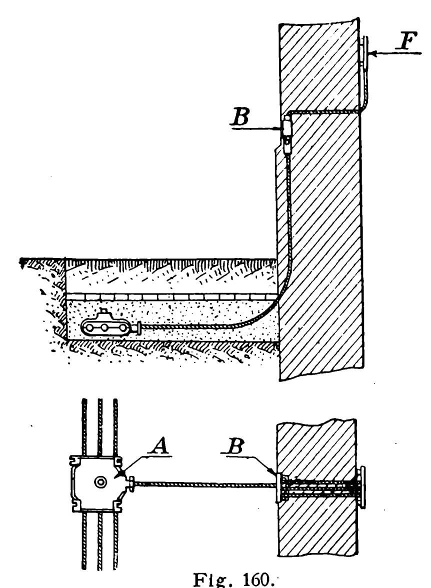


Fig. 160.

Unión de los cables de alta tensión con los cuadros. — Los cables de transporte de energía bajo alta tensión se unen a los cuadros por medio de conductores desnudos

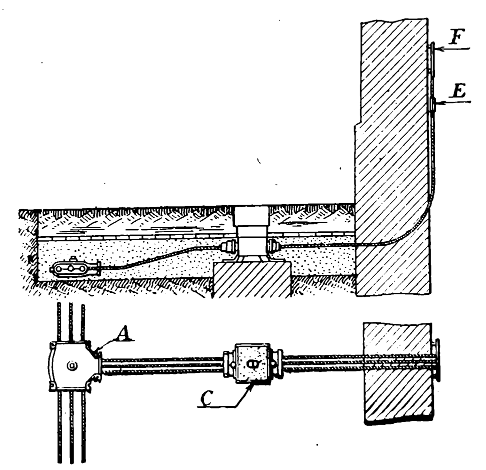


Fig. 161 (*A*, derivación; *C*, caja con cortocircuito).

que arrancan de los manguitos terminales (fig. 162) y a través de interruptores. En finales de línea, las armaduras se ponen a tierra.

Cuando una línea es lo bastante larga para que tenga una capacidad considerable, es conveniente disponer en la llegada y en la salida limitadores de rodillos, para evitar el efecto de las sobretensiones producidas por las puestas en circuito y por las rupturas de la corriente.

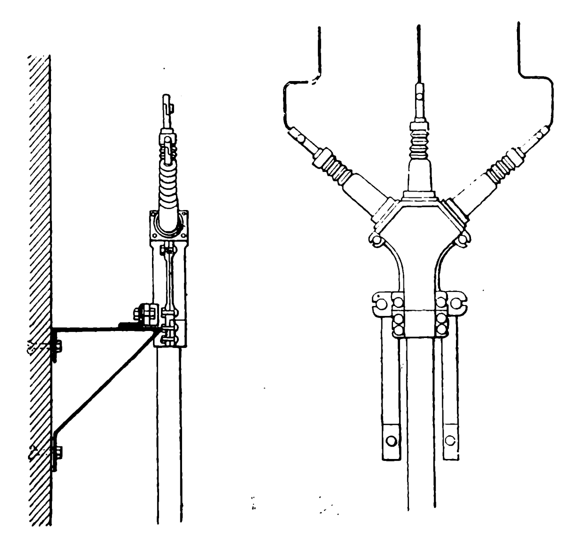


Fig. 162.

Enlace entre cables y líneas aéreas. — Tratándose de tensiones medianas, es frecuente el caso de tener que enlazar líneas aéreas con subterráneas; por ejemplo, una línea subterránea se convierte en aérea para pasar un río, y al contrario, una línea aérea se hace subterránea para atravesar una vía férrea o una edificación cualquiera.

El enlace se hace al nivel de la línea aérea mediante manguitos adecuados (figs. 163 y 164); los manguitos terminales se fijan a los postes de retención de la línea aérea o se empotran en los muros, cuando se presente la ocasión. El trozo de cable que baja hasta el suelo se protege ordinariamente con un tubo de hierro; a falta de

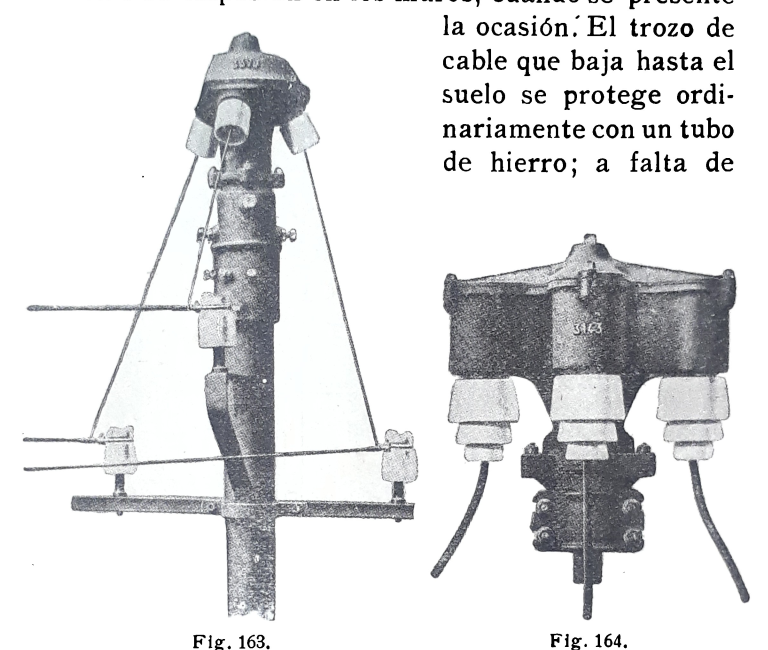


Fig. 163. Fig. 164.

tubo se cubre el cable con una rejilla metálica resistente. Estos manguitos se disponen para recibir enlaces de 2, 3, 4, 5 hilos; las porcelanas de salida están colocadas de arriba abajo, para evitar las entradas del agua de lluvia.

Observación. — Después de pasar la corriente, los conductores conservan, a causa de la capacidad del cable, una carga estática; por consiguiente, hay que tomar la precaución de descargar este condensador al hacer una maniobra cualquiera, y sobre todo si hay que poner en circuito aparatos de medida.

Pruebas con los cables después de colocados. — Es recomendable someter los cables, después de colocados, a las pruebas siguientes.

1.ª Si es posible, se ponen en cortocircuito en sus extremos y se les alimenta bajo una pequeña tensión durante dos o tres horas por una corriente aproximadamente igual a la corriente de régimen máximo.

2.ª Inmediatamente después, cuando han alcanzado de este modo la temperatura máxima a que normalmente estarán sujetos, se les somete a una tensión igual al doble de la tensión normal, durante una hora.

3.ª Para los cables destinados a tensiones inferiores a 12000 volts, se les somete a la misma tensión anterior, pero entre los cables y las cubiertas de plomo; esta tensión de ensayo, doble de la normal, se reduce en un 10 % para tensiones comprendidas entre 12000 y 20000 volts y en un 20 % para las tensiones superiores a 20000 volts.

Para estas pruebas se emplea el aparato Delon que somete al circuito cobre a un potencial *estático* cada vez mayor, y que sólo necesita una pequeña potencia de prueba. Para hacer las mismas pruebas con un transformador, habría que dar a este aparato dimensiones excesivas a causa del gran valor de la corriente de capacidad en el circuito de prueba.

Aun cuando la potencia en este caso es sólo aparente, requeriría el empleo de un aparato capaz de dar el número de kilowatts igual a los kilovolts-amperes necesarios.

CAPÍTULO VI

Redes aéreas

Disposiciones reglamentarias.—Las líneas aéreas para el transporte de energía a distancia son casi siempre de tres hilos, por ser la corriente trifásica la que da mejor utilización másica del cobre, correspondiente por lo tanto al menor gasto, es decir, a la mayor economía.

A continuación damos las disposiciones determinadas por los reglamentos franceses sobre las líneas de transporte, remitiendo al lector al Apéndice, donde encontrará íntegro el Reglamento español para instalaciones eléctricas, aprobado por R. D. de 27 marzo de 1919. De este modo, además de facilitar a nuestros lectores el modo de encontrar algún dato relacionado con las disposiciones sobre instalaciones eléctricas, podrán éstos comparar ambos reglamentos, francés y español, de donde deducirán consecuencias muy útiles para la consulta de obras francesas sobre Electricidad industrial.

ART. 3. — § 1. Los soportes de madera deben estar previstos contra las acciones de la humedad del suelo.

§ 2. En el caso de que los soportes tengan un hilo a tierra, este hilo ha de estar provisto, a una altura mínima de tres metros sobre el suelo, de un dispositivo que lo ponga fuera de alcance.

§ 3. Todos los soportes estarán numerados.

§ 4. En las distribuciones de segunda categoría (tensión eficaz superior a 150 volts), los postes metálicos estarán provistos de buena comunicación a tierra.

§ 5. En los cruces de las vías públicas, los soportes deben estar todo lo cerca que sea posible unos de otros.

ART. 5. — § 1. Los conductores deben estar colocados fuera del alcance del público.

§ 2. El punto *más bajo* de los conductores e hilos de toda clase debe estar:

a) Para las distribuciones de la primera categoría (tensión inferior a 150 volts), a 6 metros de altura mínima a lo largo y en los cruces de las vías públicas.

b) Para las distribuciones de la segunda categoría, a 6 metros a lo largo de las vías públicas, y a 8 metros cuando menos en los cruces.

Sin embargo, las redes aéreas pueden establecerse a menos de 6 metros de altura en los cruces de las obras construídas sobre las vías públicas, con la condición de llevar en toda la porción que está a menos de 6 metros, un dispositivo especial de protección para garantizar la seguridad.

§ 3. El diámetro del ánima metálica de los conductores de energía no puede ser inferior a 3 milímetros; a lo más, este diámetro puede bajar a 2 milímetros para las derivaciones particulares o red de alumbrado público de la primera categoría que no crucen con ninguna línea telegráfica o telefónica colocada por debajo.

§ 4. En el cruce de una vía pública, el ángulo que forme la dirección de los conductores con el eje de la vía ha de ser igual *cuando menos a 30°*.

§ 5. En los cruces y en las partes contiguas no debe haber en los conductores empalmes ni soldaduras; los conductores se sujetan sobre los aisladores de los

soportes del cruce y sobre los aisladores de las partes contiguas.

§ 6. En las distribuciones de la segunda categoría deben aplicarse las siguientes disposiciones.

a) Los postes tendrán, a una altura de 2 metros cuando menos sobre el suelo, un dispositivo especial para impedir, en todo lo posible, que el público pueda alcanzar a los conductores.

b) Se tomarán todas las medidas necesarias para que en el cruce y bajo los apoyos de ángulo (cambio de dirección), los conductores de energía eléctrica, en el caso de que se suelten del aislador, queden retenidos y no haya cuidado de que caigan al suelo creando contactos peligrosos.

c) Cada soporte llevará el letrero: «*Peligro de muerte*» inscrito en grandes caracteres, seguido de este otro: «*Prohibición absoluta de tocar los hilos, ni aun los caídos en el suelo*».

§ 7. En los cruces de calles, los conductores se colocarán a un metro lo menos de las fachadas y siempre fuera del ancance de los habitantes de los edificios. Si los conductores van bordeando un tejado inclinado o si pasan por encima del mismo, deben distar del mismo 1,50 m. cuando menos si son de la primera categoría, y 2 metros como mínimo, si son de la segunda.

Si el techo está terminado en terraza, los conductores deben distar del mismo 3 metros cuando menos, tanto si corresponden a la primera como a la segunda categoría.

ART. 6.—§ 1. Para los conductores, hilos, soportes, hierros, etc... la resistencia mecánica de las obras se calculará teniendo en cuenta a la vez las cargas permanentes que los órganos han de soportar y la más desfavorable de las dos combinaciones de cargas accidentales resultante de las circunstancias siguientes.

a) Temperatura media de la región con viento horizontal de 120 kilogramos de presión por metro cuadrado de superficie plana, o de 72 kilogramos por metro cuadrado de sección longitudinal de las piezas de sección circular.

b) Temperatura mínima de la región con viento horizontal de 30 kilogramos por metro cuadrado de superficie plana, o de 18 kilogramos por metro cuadrado de sección longitudinal de las piezas de sección circular.

Los cálculos justificativos deben dar el coeficiente de seguridad de todos los elementos, es decir, la relación entre el esfuerzo correspondiente a la carga de ruptura y el esfuerzo mayor a que puede estar sometido cada elemento.

§ 2. En las distribuciones de segunda categoría, el coeficiente de seguridad de las obras en las partes de la distribución establecidas sobre el suelo de las vías públicas, debe ser por lo menos igual a 3. En las partes de las mismas distribuciones establecidas en las calles o en los cruces de las vías públicas, el valor del coeficiente de seguridad es por lo menos igual a 5.

ART. 7.—En las distribuciones de la segunda categoría que sirven a varios pueblos o barrios distantes unos de otros, el contratista de la distribución está obligado a establecer, entre cada pueblo o barrio importante y la central de producción de la energía o la estación más próxima, un medio de comunicación directa.

El contratista está dispensado de cumplir esta prescripción si ha establecido, a la entrada de cada pueblo o barrio importante, un aparato que permita cortar la corriente siempre que sea necesario.

En el resto de este capítulo, veremos cómo se cumplen y realizan estas condiciones.

Soportes

Soportes de pared.—A veces, y tratándose de distribuciones a baja tensión, hay que poner las líneas sobre soportes metálicos empotrados en las paredes o fijados sobre la armadura de los edificios.

Estos soportes son generalmente de hierros laminados, agujereados y empalmados, con patas adecuadas para empotrarlos en la pared.

La unión o empalme de las diferentes piezas de un soporte metálico debe hacerse teniendo en cuenta que

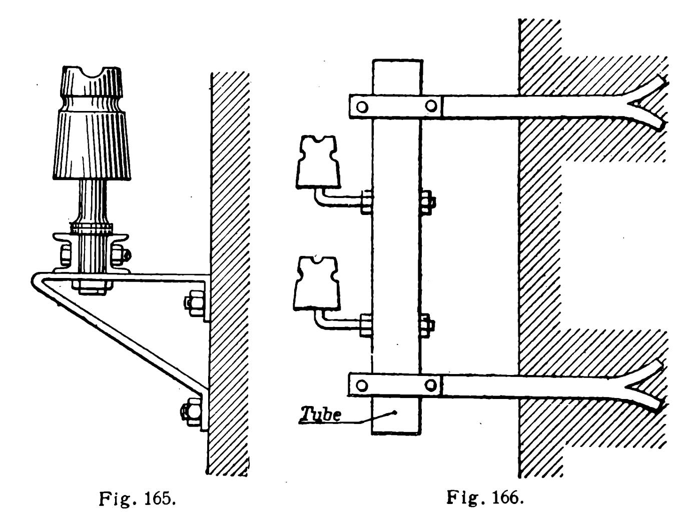


Fig. 165. Fig. 166.

hay que evitar los esfuerzos de arranque sobre la parte empotrada; debe procurarse que estén formados por triángulos rectángulos cuya hipotenusa se apoye sobre la pared por el lado de donde se ejerza la tracción (fig. 165).

Los soportes tubulares de sección circular o cuadrada se emplean mucho (fig. 166) gracias a su ligereza

y buena resistencia. El tipo más empleado es el de tubo cuadrado (sistema Lorain), que ordinariamente se galvaniza para ahorrarse pintura y gastos de conservación. Si un soporte vertical se sujeta con obenques, los puntos de unión deben estar lo bastante bajos para no producir contacto alguno con la línea; las uniones de obenques deben hacerse sobre guarniciones de hierro sin ángulos salientes que pudieran cortar el cable.

Postes de madera.—Los postes de madera para las líneas aéreas están constituídos por maderos sometidos a un tratamiento apropiado para evitar que puedan podrirse. Estos maderos son de pino, abeto, álamo o castaño; se evita que se pudran inyectándoles creosota, sulfato de cobre, cloruro de zinc, bicloruro de mercurio, etc. La parte del poste que ha de ir bajo tierra se suele quemar, aunque sólo superficialmente.

Un buen poste debe tener en el extremo superior un diámetro igual a los dos tercios del diámetro a ras del suelo. Las proporciones siguientes son las especificadas por los Reglamentos de Telégrafos:

Longitud en metros.	6,5	6,5	8	10	12	15	20
Diámetro a un metro de la base, en centímetros	14	17	18	22	26	30	30
Diámetro en la punta.	9	12	13	14	17	12	12
Parte que ha de enterrarse, en centímetros	1,5	1,5	2	2	2	2,3	2,4

La altura del poste se calcula de modo que en la parte más baja de la línea (flecha máxima) la distancia al suelo sea la reglamentaria.

La punta del poste se corta en forma cónica y

puede protegerse con una placa metálica para que escurra el agua de lluvia; como estas placas, cuando son de palastro galvanizado o de zinc, resultan bastante caras, lo único que a veces se hace es embadurnar el extremo del poste con alquitrán caliente.

Con una carga de 0,7 kilogramos por milímetro cuadrado, un poste de altura *h* metros y diámetro *d* centímetros (en el suelo) puede soportar los siguientes esfuerzos *F* (Hospitalier):

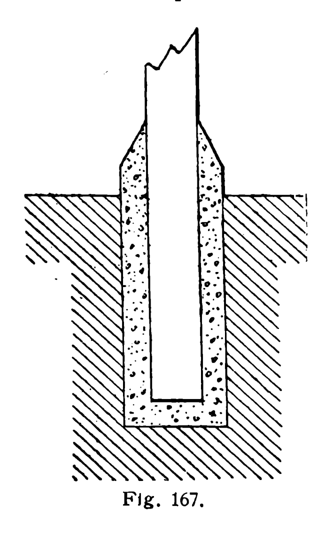
h	*d*	*F* (en Kg)	*h*	*d*	*F* (en Kg)
8	18	51	10,5	23	81
8,5	19	57	11	24	88
9	20	63	11,5	25	95
9,5	21	69	12	26	103
10	22	75	—	—	—

Luces máximas de las líneas industriales sobre postes de madera (Luz es la distancia entre dos postes)

Diámetro de los hilos en mm	Luz en metros			
	2 hilos	3 hilos	4 hilos	5 hilos
2	400	270	200	133
4	300	200	150	100
5	240	160	120	80
6	200	133	100	66
7	170	114	85	57
8	150	100	75	50
9	133	89	66	44
10	120	80	60	40

Colocación de los postes.—Los postes se carbonizan quemándolos, o se embadurnan con alquitrán

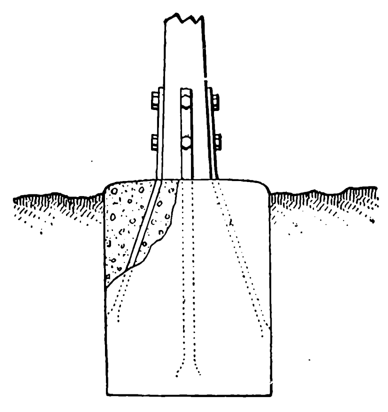
caliente si han de estar en contacto directo con el suelo. El fondo del agujero se cubre con arena o guijarros finos para asegurar la infiltración del agua. El poste, una vez colocado cerca del agujero, se eleva con facilidad; por ejemplo, se puede sujetar su pie, mientras que un operario lo levanta por la punta; resulta cómodo mantener el poste así elevado mediante una escalera de mano que se inclina de modo que el poste descanse sobre el escalón superior, y entonces el operario pasa por entre la escalera y el pie del poste y continúa elevando a éste al mismo tiempo que deja resbalar a lo largo del poste el escalón superior de la escalera, que de este modo va poniéndose cada vez más derecha. Una vez introducido el poste en el agujero, se llena éste de tierra, que se apisona cuidadosamente alrededor del poste; después de apisonado el suelo debe formar un cono saliente en el pie del poste, y no una cavidad, o cono entrante, que retendría el agua de lluvia.


Fig. 167.

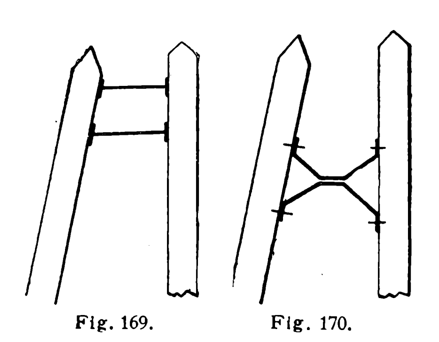
Cuando el terreno es muy húmedo se prefiere rodear el pie del poste con un revestimiento poco espeso de hormigón, que además de la ventaja de producir un empotramiento mejor, presenta la de no dejar penetrar la humedad ni el agua en el agujero (fig. 167).

Este procedimiento se emplea también para reforzar un poste gastado; en este caso se dispone alrededor del poste una armadura de alambre de hierro.

Una buena fijación de los postes en terrenos defectuosos se consigue también formando un bloque de hormigón en el que van introducidas cuatro grapas de hierro; el poste se fija en estas grapas mediante tirafondos (fig. 168).


Fig. 168.

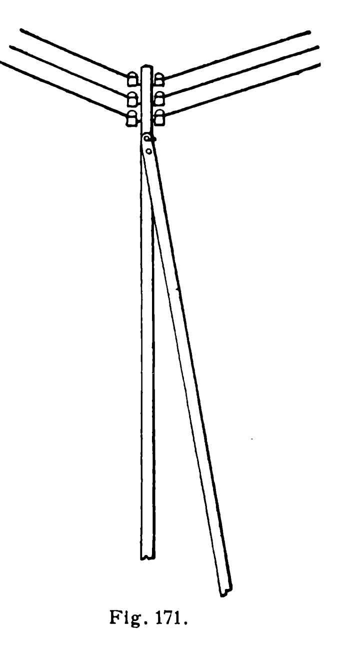
Los soportes de hierro en que van los aisladores se fijan en el poste mediante tirafondos o bridas con tornillos. La colocación de los tirafondos debe hacerse con mucho cuidado, sobre todo en la punta de los postes; hay que practicar primero en el poste unos agujeros donde van los tirafondos previamente ensebados; estas precauciones son necesarias para que la madera no se abra y el agua no pueda penetrar en su interior.


Fig. 169. Fig. 170.

Para las líneas de tres hilos, se disponen generalmente los conductores en triángulo; dos hilos a un lado del poste, y el tercero al otro; también se puede colocar un aislador en la punta, y uno a cada lado, algo por debajo. En las curvas, cuando el esfuerzo de la línea tiende a inclinar al poste, se apuntala éste, para lo cual se colocan dos postes a poca distancia uno

de otro, y se inclina uno de ellos de modo que se acerquen por la punta, y se hacen ambos solidarios entre sí mediante hierros adecuados; la bisectriz del ángulo que forma la línea en la curva debe estar contenida en el plano determinado por los dos postes (figs. 169, 170 y 171).

Para reforzar un poste que tienda a curvarse, se le puede sujetar con un obenque que se fija en el tercio superior de su altura. El dispositivo indicado por la figura 172 se emplea también con frecuencia; se amarra un cable al pie del poste, y se fija con una brida en la parte superior, poniéndolo tirante mediante un empalme metálico; la resistencia resultante a la flexión es bastante mayor que la de un poste sencillo.


Fig. 171.

Postes tubulares.—Los postes tubulares tienen la ventaja de ser ligeros y resistentes; ordinariamente están formados de varios tubos de diferentes diámetros. La parte enterrada va casi siempre introducida en un bloque de hormigón y los soportes de los aisladores van fijados en la punta por medio de bridas que abrazan al poste (fig. 173).

Postes de cemento armado.—Estos postes son de larga duración y requieren muy poco trabajo de con-

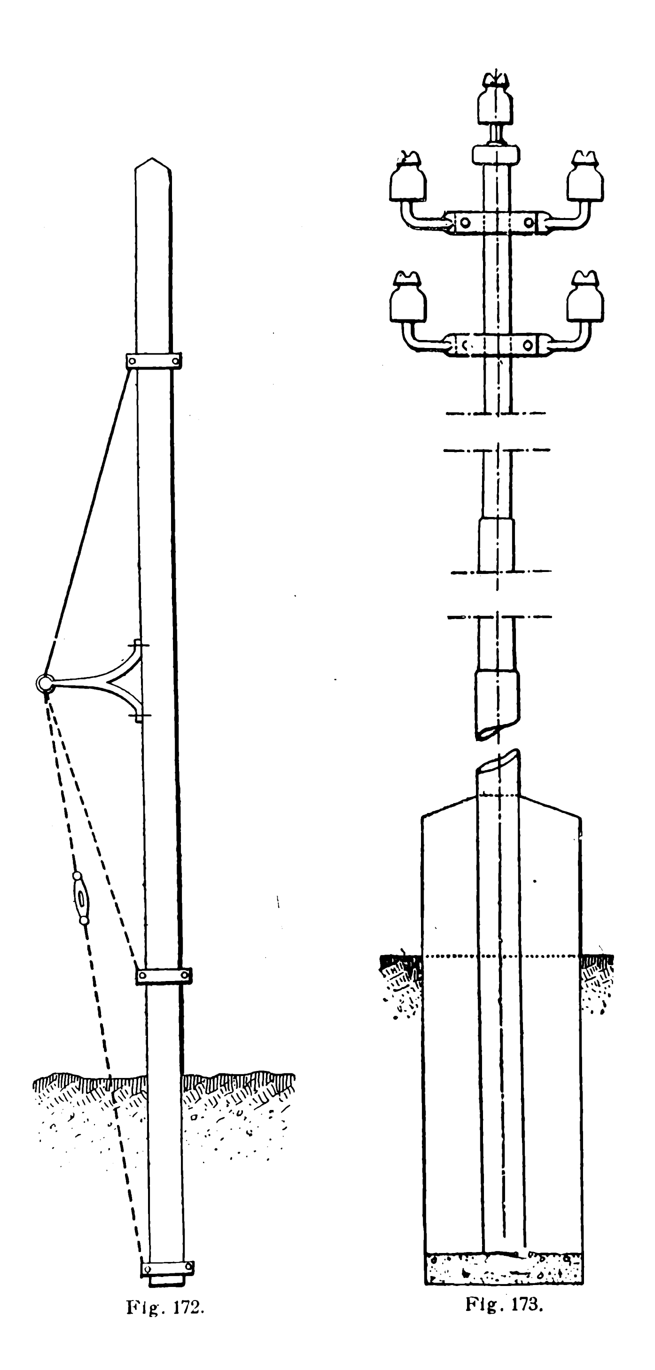


Fig. 172.

Fig. 173.

servación. La armadura está formada por varillas rec-

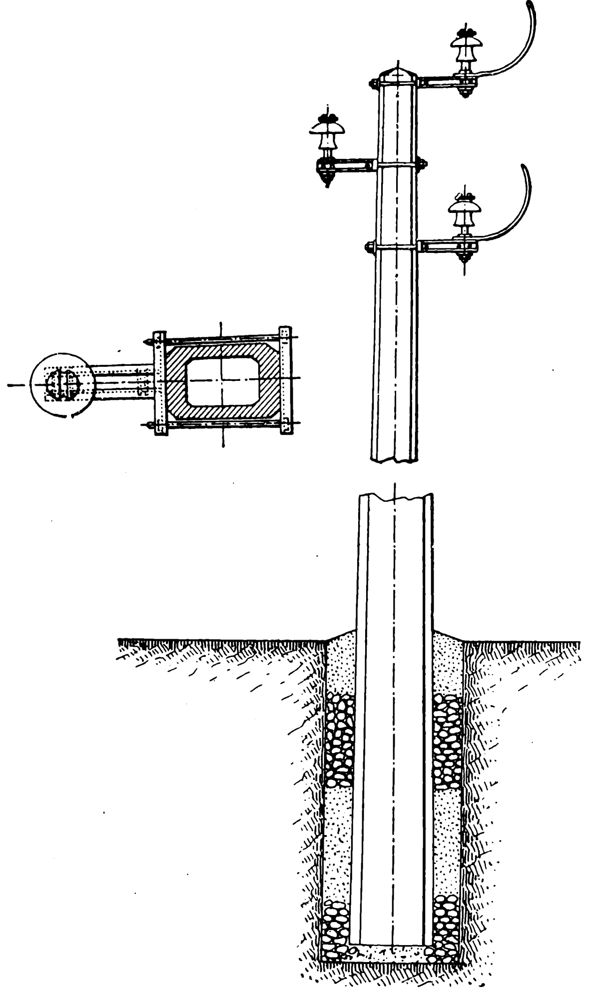
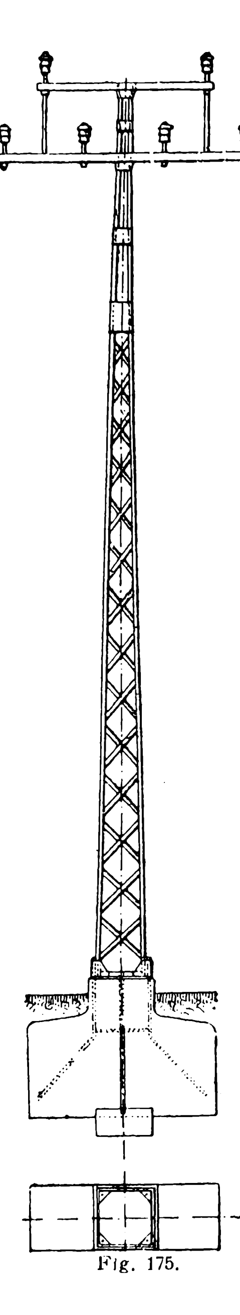


Fig. 174.

tas de acero redondo y por un alambre de acero arrollado en hélice y ligado sobre las varillas. A causa de su


Fig. 175.

mucho peso y de las dificultades de transporte, se construyen estos postes casi siempre en el sitio mismo donde han de instalarse. No pueden colocarse estos postes hasta seis semanas después de fabricados; los agujeros en que van introducidos en el suelo se recubren con hormigón (fig. 174) o cascotes.

La forma y la sección de los postes de cemento armado son distintas para las diferentes fábricas, pero siempre con vistas a la mayor economía de material.

Postes de celosía.—Para las líneas pesadas y grandes luces, se emplean postes de hierros laminados en forma parecida a las celosías. Estos hierros están dispuestos y calculados para resistir el mayor esfuerzo que se pueda producir, es decir, para el caso más desfavorable de flexión, consistente en la rotura accidental y completa de uno de los tramos entre poste y poste. El pie de estos postes va fijamente sujeto en un bloque de hormigón. Si el peso del poste es muy grande y el terreno es movedizo, se puede

hacer que el bloque de hormigón descanse sobre pilotes.

Para poder atender a la conservación del poste, sin necesidad de interrumpir la corriente en la línea, se hace la parte superior del poste de hierro estañado, con lo cual basta conservar la parte inferior pintándola cada 4 ó 5 años.

La fijación de los soportes de los aisladores se hace con piezas metálicas sujetas con tornillos (fig. 175).

Los postes de grandes dimensiones se llevan al lugar de su colocación en varias partes, que se unen con tornillos. Los de menor importancia salen del taller completamente montados.

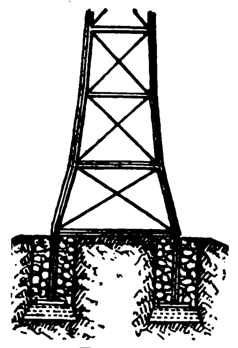


Fig. 176.

Las dimensiones de la base del poste rara vez pasan de un metro por lado, y su cimentación requiere de 2 a 2,5 metros cúbicos de hormigón.

A veces hay que utilizar soportes de grandes dimensiones, cuando el número de conductores que han de sostener es elevado y formando una línea quebrada. Para este caso se emplean torres de acero formadas por elementos que se unen entre sí en el lugar de su

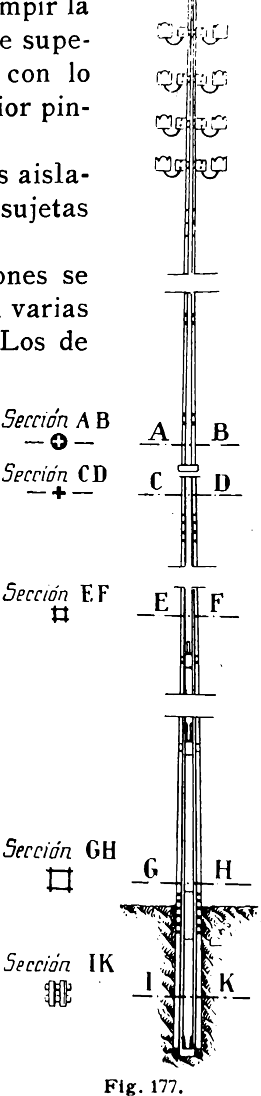


Fig. 177.

colocación; ordinariamente estas torres son cuadrangulares y se fijan mediante hierros en ángulo (fig. 176).

Un poste simple puede formarse con dos hierros perfilados (raíles o hierros en doble T), unidos con tirantes (fig. 177).

La masa de todo poste metálico debe unirse a tierra.

Colocación de los postes grandes.—Los postes de madera y los de hierro poco pesados, se colocan como ya hemos dicho. Pero los postes de mucho peso hay que elevarlos mediante aparejos convenientes. Para los postes más importantes se recurre a los tornos elevadores.

Los postes metálicos, antes de ser montados, se cubren por todas partes con una capa de pintura de minio (sin esencia de trementina) y después se les da otra mano con blanco de zinc. Una vez colocados, se les dan varias manos de pintura, así como a las placas que entran en el zócalo. La placa de tierra no debe recibir ninguna pintura, y ha de introducirse a una profundidad de 3,20 metros cuando menos por bajo de la masa de hormigón, y rodearla con una capa de 10 centímetros de espesor de carbón de madera apisonado y humedecido. Esta placa se une al poste por encima del nivel superior del hormigón mediante un cable formado por tres hilos de hierro galvanizado torcidos en hélice y cada uno de 4 milímetros de diámetro; los extremos de este cable se sueldan cuidadosamente a la placa de tierra por una parte, y al poste por la otra.

El hormigón se forma con dos partes en volumen de almendrilla o pedazos de ladrillos y una parte de mortero. La almendrilla está constituída por piedras duras, trituradas groseramente, y sin ninguna tierra

ni materia friable; los trozos de ladrillos han de ser duros, bien cocidos y sin mortero; las dimensiones de estos pedazos han de ser de tres a cinco centímetros la mayor.

El mortero está compuesto de 500 kilogramos de cemento de fraguado lento, y un metro cúbico de arena dura; estos dos materiales se mezclan muy bien en seco y después se mojan y amasan hasta formar una pasta. Entonces se reparte la almendrilla con uniformidad por toda la masa y se apisona fuertemente el hormigón por capas que no pasen de 15 centímetros de espesor.

El hormigón de la base se coloca por lo menos veinticuatro horas antes de colocar el poste y el resto del hormigón inmediatamente después de colocado el poste.

Los postes de hierro con el pie dentro de un bloque de cemento, generalmente son atacados por la herrumbre en los puntos en que entra en el cemento. Una gran protección contra este inconveniente consiste en practicar en el bloque de cemento, inmediatamente alrededor del hierro, ranuras poco profundas, que se llenan con brea o con una mezcla de pez, asfalto y alquitrán, y de tal modo que esta mezcla plástica forme un ligero saliente que evite el estancamiento del agua de lluvia.

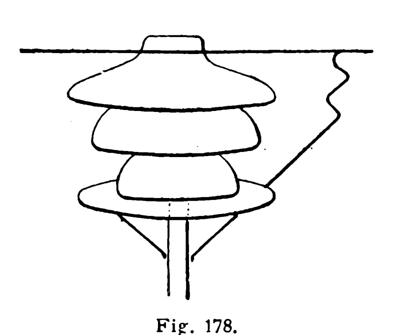
Aisladores

Los aisladores son de porcelana o de vidrio; se emplean en forma de campanas, simples o múltiples, y en cadenas formadas con varios elementos sucesivos, sobre todo para las altas tensiones.

Los aisladores deben resistir en la prueba a una tensión triple de la tensión de utilización, si ésta es inferior a 10000 volts; para las tensiones mayo-

res, deben resistir una tensión igual a 30000 volts, más dos veces el exceso de la tensión de servicio sobre 10000 volts.

La elección y colocación de un aislador tiene una gran importancia desde el punto de vista de la buena marcha de una instalación, pues las roturas de los aisladores llevan consigo interrupciones de servicio largas y a veces muy perjudiciales. Para la buena conservación de una línea, es recomendable cambiar un aislador en cuanto se produzcan en él chispas o efluvios durante el funcionamiento de la línea.


Fig. 178.

Las roturas de los aisladores pueden deberse a las descargas de sobretensiones accidentales o a causas puramente mecánicas.

Para evitar las roturas por chispas, hay que dotar a la línea de un sistema de pararrayos que funcionen bien. En algunos casos, parece conveniente disponer en el soporte del aislador un anillo metálico destinado a desviar toda chispa posible (fig. 178).

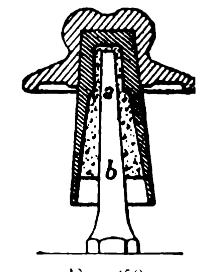


Fig. 179.

Los accidentes de orden mecánico se deben frecuentemente a una mala disposición de los aisladores. La fijación de los aisladores en sus soportes por medio del azufre debe abandonarse por ser insuficiente. Una buena fijación se consigue con el cemento portland, y debe hacerse de tal modo que la varilla

metálica que soporta al aislador conserve su elasticidad; por consiguiente, nunca se deberá llenar de cemento la campana inferior, porque de este modo se haría la porcelana solidaria de los movimientos de flexión de la varilla y se rompería con toda seguridad; los movimientos de flexión del hierro de *a* a *b*, deben ser completamente libres (fig. 179).

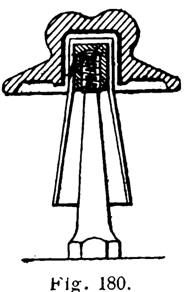


Fig. 180.

Una buena fijación se consigue con una pieza metálica (fig. 180) consistente en una anilla roscada exterior e interiormente de tal modo que se atornille sobre la varilla-soporte, mientras que el aislador puede atornillarse sobre la anilla.

La fijación del cable sobre el aislador tiene también su importancia; no hay ningún inconveniente en colocar el cable sobre el vértice del aislador en el caso de un aislador de alineación; pero no sucede lo mismo en una curva o sobre un aislador de retención. En este caso hay que pasar la línea por la garganta del aislador y a ser posible emplear un aislador en que la varilla-soporte esté en el interior, por lo menos al nivel de la garganta; de este modo, el esfuerzo de la línea sobre el aislador que tiende a romperlo, se encuentra repartido entre éste y sobre la varilla, y hay menos peligro de que salte rota la cabeza del mismo.

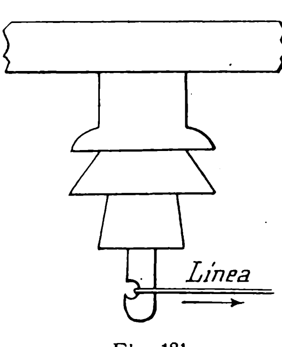


Fig. 181.

Para los aisladores de retención, está contraindicado el empleo del aislador de cabeza empotrada, al cual

se fija la línea por una varilla metálica empotrada en el interior (fig. 181). Este sistema presenta el inconveniente de tener dos empotramientos, y la porcelana está sometida a esfuerzos anormales.

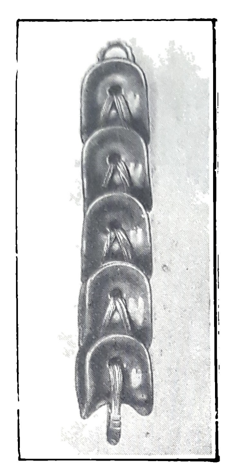


Fig. 182.

Para las tensiones muy altas, se emplean los aisladores en cadena (fig. 182); estas cadenas de aisladores sólo pueden resistir esfuerzos de tracción, requiriendo, por lo tanto, diferentes disposiciones, según su empleo. En las figuras 183 y 184, las cadenas están dispuestas para sostener una línea recta, es decir, en alineación; la figura 185 representa el caso de utilización de un aislador de cadena en una retención y en una curva.

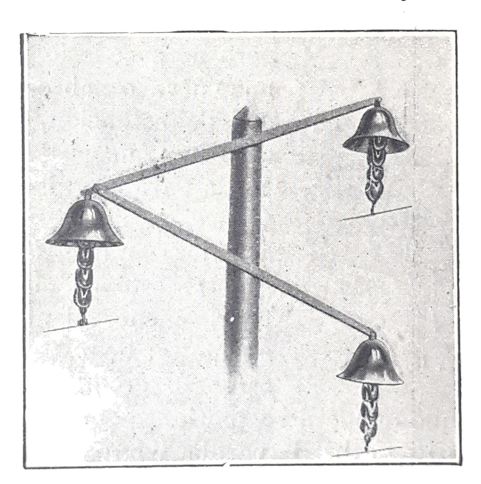


Fig. 183.

Resulta ventajoso formar estas cadenas con esla-

bones unidos mediante cables flexibles; estos eslabones no presentan ningún empotramiento (sistema V. P. C.) y son muy resistentes. Se puede proteger cada cadena vertical con una campana metálica, que la resguarda de la lluvia y la nieve (figs. 183 y 184).

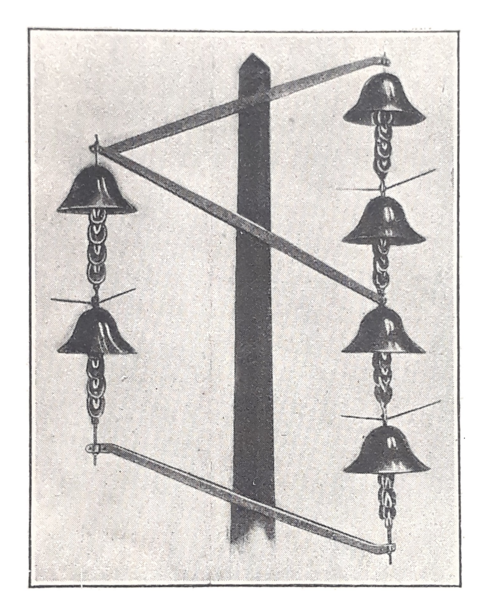


Fig. 184.

La cadena de aisladores presenta la ventaja de realizar una unión flexible de la línea con los soportes. Cuando una parte está sometida a una sobrecarga accidental, la cadena aisladora se inclina de modo que aumenta un poco la flecha, repartiéndose el esfuerzo entre los tramos inmediatos.

Colocación de la línea. — Ya hemos visto que los reglamentos determinan:

1.º *La altura mínima de los conductores sobre el*

suelo. — Esta altura es de seis metros a lo largo y a través de los caminos públicos para la distribuciones

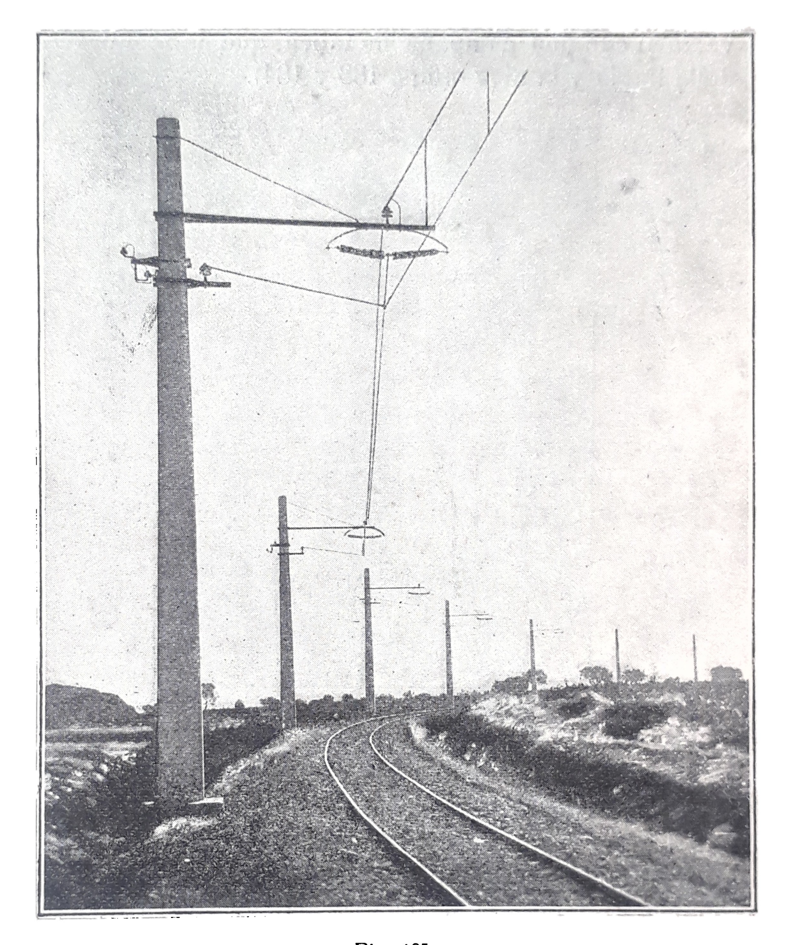


Fig. 185.

de la primera categoría; 6 metros a lo largo de las vías públicas y 8 metros a través de las mismas, para las distribuciones de la segunda categoría.

2.° *El esfuerzo a que debe estar sometido el conductor.* — El esfuerzo de rotura es:

para el cobre.	28 Kg por mm²
para el bronce con el 97 % de cobre . .	45 » » »
para el aluminio	22 » » »

El coeficiente de seguridad definido por la relación:

$$\frac{\text{esfuerzo correspondiente a la carga de rotura}}{\text{esfuerzo máximo a que puede someterse el conductor}}$$

debe ser igual por lo menos a 3, y llegará a 5 en las ciudades y al atravesar los caminos.

3.° *El efecto producido por el viento.* — El viento ejerce sobre los conductores una acción que se suma a la de sus propios pesos; la resistencia del conductor debe ser tal que el esfuerzo no pase nunca del límite fijado anteriormente cuando el viento ejerce una fuerza de 120 a 125 kilogramos por metro cuadrado de superficie plana, correspondiente a un esfuerzo de 72 kilogramos por metro cuadrado de sección longitudinal de cuerpo cilíndrico.

Además, habiéndose calculado la línea para que se cumplan las condiciones anteriores, hay que comprobar que:

a) El esfuerzo ejercido sobre el hilo no pasa del límite fijado, cuando la temperatura baja al menor valor posible en la región de que se trate.

b) La flecha no ha de aumentar nunca de modo que el punto más bajo del hilo descienda por bajo del valor fijado, cuando la temperatura alcance el mayor valor posible en la región en que esté la línea.

c) La nieve o el hielo que pueda adherirse a los conductores no ha de aumentar el esfuerzo ejercido sobre el hilo por encima del límite fijado.

Si las condiciones climatológicas pudieran hacer sobrepasar estos límites, hay que modificar la flecha o la luz.

Ábaco de Blondel para los conductores de cobre (bronce ordinariamente empleado).—El ábaco de Blondel permite determinar muy fácilmente: para una luz (distancia entre postes) dada y una flecha dada, el esfuerzo que hay que ejercer sobre el conductor; o para un esfuerzo dado sobre el conductor y una flecha dada, la luz que hay que dar, de modo que queden cumplidas las condiciones anteriores.

Este ábaco está formado por dos series de curvas, las primeras correspondientes al esfuerzo por milímetro cuadrado soportado por el conductor; las segundas correspondientes a la flecha, es decir, a la distancia entre el punto más bajo de la parte de conductor comprendida entre dos postes, y la recta que pasa por los aisladores donde va sujeto este conductor (fig. 186). Conociendo la altura h de los aisladores sobre el suelo, y la flecha f, se tiene la distancia $h - f$ que hay entre el punto más bajo del conductor y el suelo. Como abscisas se toman en este ábaco las longitudes de las luces o tramos, expresadas en metros.

Se emplea este ábaco del modo siguiente:

1.º Supongamos que se quiere determinar el esfuerzo por milímetro cuadrado soportado por un cable cuya luz o tramo es d metros, con una flecha de f metros. Se toma sobre el eje de las abscisas la longitud d y se ve en qué punto la ordenada de este punto corta a la curva correspondiente a la flecha f (fig. 187). Por este punto de intersección pasa una curva de los esfuerzos que da el esfuerzo buscado que se ejerce sobre el conductor. Por ejemplo, se ve en el ábaco (fig. 186) que para una luz de 50 metros y una flecha de 30 cen-

tímetros, el esfuerzo es de 9 kilogramos aproximadamente por milímetro cuadrado.

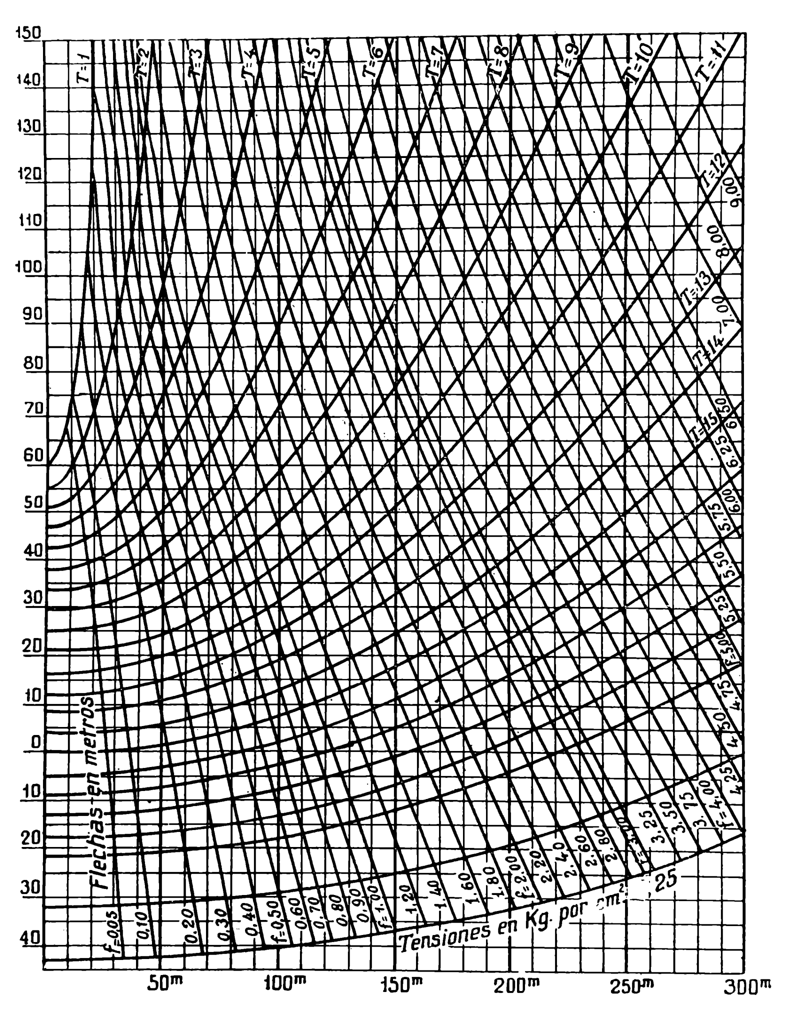


Fig. 186 (flechas f en m.; tensiones T en Kg/mm²).

2.° ¿Cuál debe ser la luz para que el esfuerzo sea

de P kilogramos por milímetro cuadrado, siendo f la flecha?

Se busca el punto de encuentro de las curvas correspondientes al esfuerzo P kilogramos y a la flecha f, y

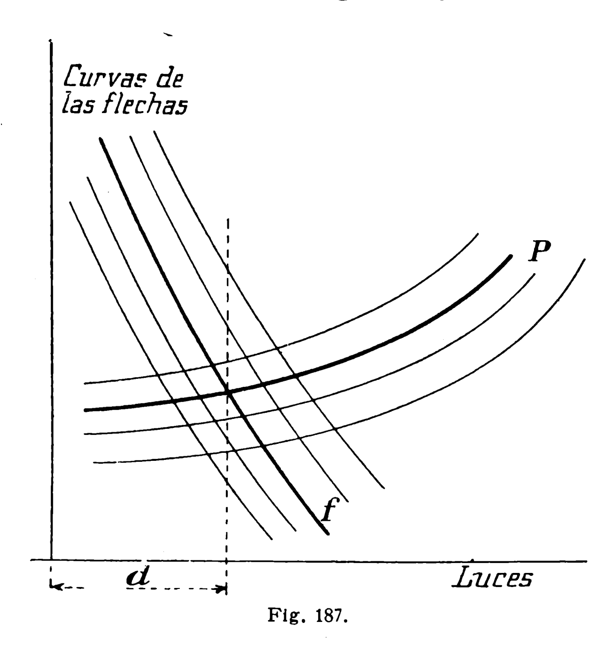


Fig. 187.

la abscisa correspondiente da la luz o longitud del tramo. Por ejemplo, si se quiere tener un esfuerzo de 9 kilogramos por milímetro cuadrado con una flecha de 50 centímetros, la luz debe ser de 65 metros.

Influencia de las variaciones de temperatura.—Sobre el eje Oy de las ordenadas de este mismo ábaco están indicadas las temperaturas, de cinco en cinco grados (fig. 188). Supongamos que se tenga establecida una línea, habiéndose dado la luz y la flecha, como ya hemos dicho; el ábaco da la tensión del hilo, a la tem-

peratura a que se ha hecho el tendido. Se quiere saber en qué nuevas condiciones se encontrará el hilo si la temperatura se eleva t^0 grados.

Sea A el punto determinado por el encuentro de la curva de los esfuerzos con la curva de las flechas, o

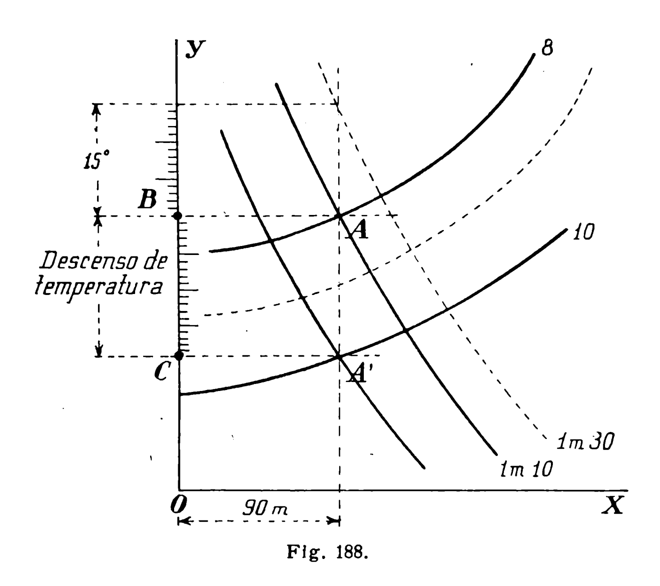


Fig. 188.

por el encuentro de la ordenada correspondiente a la luz dada con la curva de las flechas. Por este punto se traza una paralela al eje de las abscisas, que cortará al eje de las ordenadas Oy en un punto B. A partir de este punto B se toma sobre Oy una longitud que mida la variación prevista de temperatura, hacia O si ésta baja, y en sentido contrario si se trata de una elevación. De esta manera resulta un punto C; se busca el punto de encuentro de la paralela al eje de las abscisas $O\,x$ trazada por este punto con la paralela a $O\,y$ que pasa por el punto A. Por el punto A' que así resulta pasa una curva de esfuerzos y una curva de flechas. Si la tem-

peratura ha experimentado un descenso, la flecha ha disminuído, y lo que importa conocer es el nuevo esfuerzo a que está sometida; al contrario, si la temperatura se eleva, el esfuerzo disminuye y lo que interesa saber es si la nueva flecha, que ha aumentado, no hace que el punto más bajo del conductor quede a una distancia demasiado corta del suelo.

EJEMPLO:

Altura de los postes	12 metros
Diámetro de los conductores . .	8 milímetros
Luz o longitud del tramo. . . .	90 metros
Resistencia del cable a la rotura .	35 kilogramos por mm^2

En el trayecto general de la línea, fuera de las ciudades, el coeficiente de seguridad debe ser por lo menos igual a 3, por lo cual el esfuerzo por milímetro cuadrado no debe pasar de $\frac{35}{3} = 11,66$ kilogramos, en las condiciones más desfavorables. Si admitimos un esfuerzo de 8 kilogramos por milímetro cuadrado en el momento de hacer el tendido, el ábaco da para la luz de 90 metros una flecha de 1,10 m., con lo cual el punto más bajo de la línea está a más de 8 metros sobre el suelo.

Si se admite que la temperatura pueda bajar 20° a contar de la temperatura en el momento de la colocación, se encuentra un esfuerzo de 10 kilogramos, inferior, por consiguiente, al límite impuesto. Si la temperatura puede elevarse en 15°, se ve que la flecha baja en 1,30 m., y el punto más bajo queda siempre por encima de los 6 metros reglamentarios.

La sección del cable es $\frac{3,1416 \times 8^2}{4} = 50,27$ milímetros cuadrados; por consiguiente, se tenderá cada parte del cable bajo un esfuerzo indicado por un dinamó-

metro fijado por una parte al poste y por la otra al cable, e igual a:

$$50{,}27 \times 8 = 402 \text{ kilogramos.}$$

Influencia del viento. — El efecto del viento puede traducirse en un aumento de peso del conductor: sea p' el esfuerzo resultante (peso y viento), y p el esfuerzo debido solamente al peso del conductor.

La siguiente tabla da, para el esfuerzo por metro cuadrado debido al viento, y para los diferentes diámetros del conductor, el valor de la relación $\frac{p'}{p}$.

Diámetro del hilo mm	Sección del hilo mm²	Valor de $\frac{p'}{p}$ para un viento de:				
		125 Kg	150 Kg	180 Kg	200 Kg	280 Kg
2	3,1416	5,188	6,182	7,398	8,206	11,447
2,5	4,9087	4,193	4,988	5,949	6,592	9,177
3	7,0686	3,538	4,194	4,988	5,521	7,668
3,5	9,6211	3,076	3,631	4,307	4,761	6,592
4	12,566	2,735	3,214	3,800	4,194	5,789
4,5	15,904	2,474	2,893	3,408	3,755	5,166
5	19,635	2,269	2,640	3,098	3,408	4,670
5,5	23,758	2,104	2,436	2,847	3,126	4,265
6	28,274	1,970	2,269	2,640	2,893	3,930
6,5	33,183	1,858	2,158	2,467	2,698	3,648
7	38,485	1,765	2,011	2,321	2,533	3,408
7,5	44,179	1,686	1,912	2,195	2,391	3,201
8	50,266	1,618	1,825	2,088	2,269	3,021
8,5	56,745	1,560	1,751	1,994	2,162	2,843
9	63,617	1,510	1,686	1,912	2,068	2,724

Una vez hallado de este modo el valor de esta relación, se procede de la manera siguiente.

Se determina el punto A como ya hemos dicho, sin tener en cuenta el efecto del viento; se multiplica la longitud d de la luz, por la relación $\frac{p'}{p}$ y se toma esta nueva luz ficticia $d \times \frac{p'}{p}$ sobre el eje de las abscisas; se traza la ordenada del punto así obtenido y la paralela al eje de las abscisas por el punto A; estas dos

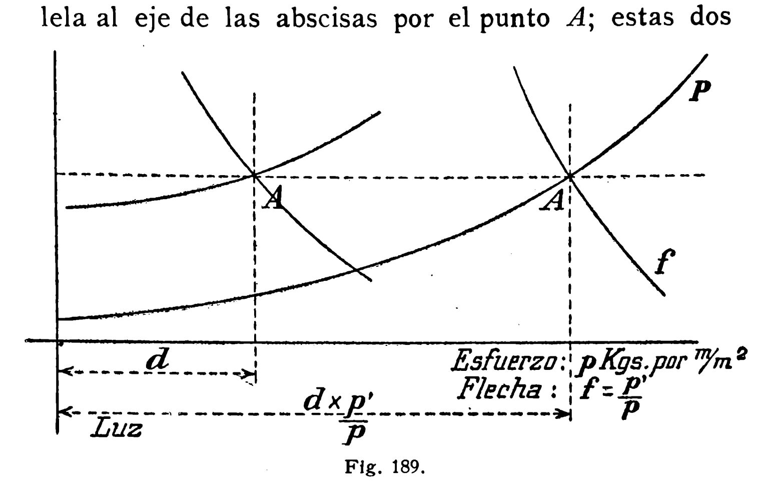


Fig. 189.

rectas se cortan en un punto A, por el cual pasan: una curva de esfuerzos que da el esfuerzo resultante (peso del hilo y viento), y una curva de flechas; el valor de la flecha dado por esta curva *dividido* por $\frac{p'}{p}$ da la nueva flecha (fig. 189).

Ejemplo. — Sea un conductor de 4 milímetros de diámetro, con una luz de 50 metros y una flecha de 50 centímetros.

El ábaco da para el esfuerzo debido al cable solo 5,50 Kg. Se trata de saber cuál será el nuevo esfuerzo a que quedará sometido el hilo si la temperatura baja 20° y el viento tiene una fuerza de 125 kilogramos

(72 kilogramos por metro cuadrado de sección longitudinal del hilo).

La ordenada del punto 50 corta a la curva de flecha 0,50 en el punto A, y la paralela al eje de las abscisas trazada por A corta al eje de las ordenadas en el punto

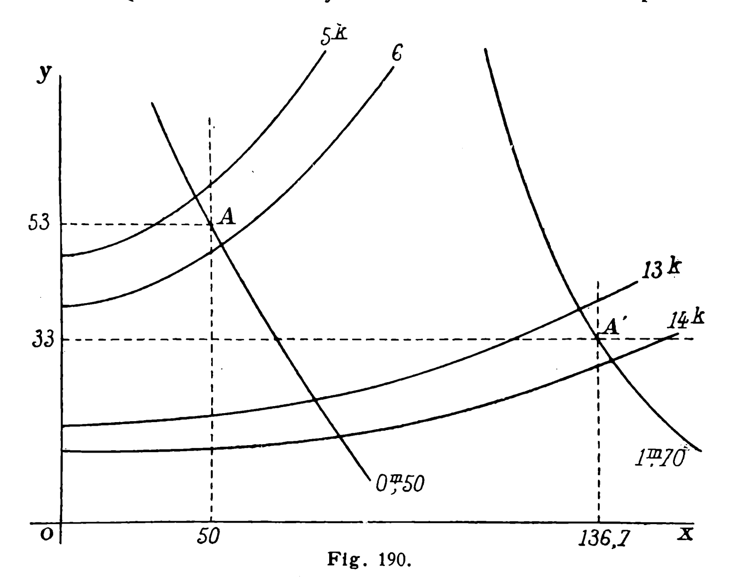


Fig. 190.

53; por el punto 53 — 20 = 33, se traza la paralela al eje de las abscisas (fig. 190).

La tabla anterior da para un diámetro de 4 milímetros y un viento de 125 kilogramos:

$$\frac{p'}{p} = 2,735;$$

por lo tanto, se toma una abscisa igual a $50 \times 2,735 =$ $= 136,7$. La paralela a Oy trazada por este punto corta a la paralela a Ox trazada por el punto de ordenada 33 en un punto A' por el cual pasa la curva de los esfuerzos 13,60 Kg. y la curva de flecha 1,70. Por consiguiente, para el viento de 125 kilogramos, el esfuerzo

que soporta el hilo es de 13,60 kilogramos y la flecha:

$$\frac{1,70}{2,73}=0,60 \text{ m}.$$

OBSERVACIÓN. — También se puede determinar el valor de la flecha de un modo sencillo, como sigue: se hace oscilar el conductor, sujetándolo cerca de su punto de unión con el aislador, y moviéndolo transversalmente, de modo que se le pueda dar en el momento conveniente una fuerte impulsión. Se cuenta entonces el número n de oscilaciones simples que hace el cable en un minuto, y está demostrado que la flecha tiene por valor:

$$f=\left(\frac{669}{n}\right)^2.$$

Hay que tomar algunas precauciones para que el conductor oscile todo al mismo tiempo, es decir, como si fuera un cuerpo rígido. Esta fórmula se aplica bastante en la práctica, y da una precisión suficiente, sirviendo para comprobar la tensión de los conductores al colocarlos. Como medida excepcional, se emplea un dinamómetro para cerciorarse de la tensión conveniente del hilo, y en este caso se hace la prueba solamente en un tramo de la línea.

Distancia entre los soportes. — Generalmente se admiten las siguientes:

para postes de madera	40 metros
para postes de cemento armado . . .	60 »
para soportes metálicos	80 a 100 metros
para torres metálicas	150 a 200 »

Distancia entre los conductores. — Esta distancia debe ser igual, siempre que sea posible, al número que resulta de dividir la tensión entre hilos por 30000; de este modo queda la distancia expresada en metros. Nunca debe ser menor de 0,60 metros.

Efecto de la nieve y del hielo. — La nieve no queda adherida a los conductores si hace viento fuerte. Se puede apreciar su efecto admitiendo los dos casos siguientes: 1.° Un viento de 10 kilogramos por metro cuadrado de superficie plana (0,57 × 10 de conductor cilíndrico), con un espesor de hielo que triplique el diámetro del hilo y aumente en el 100 por 100 el peso del mismo.

2.° Un viento de 30 kilogramos y una capa de hielo que haga igual al doble el diámetro del hilo, y su peso igual a 1,5 veces el que tenía antes.

Para conocer en estas condiciones el esfuerzo sobre el conductor y la flecha, se procede como se hizo para el efecto del viento.

La tabla siguiente da, para los dos casos anteriores, los valores de la relación $\frac{p'}{p}$.

Diámetro del hilo mm	Sección del hilo mm²	Valor de $\frac{p'}{p}$ para: Viento de 10 Kg; hielo que triplica el diámetro y duplica el peso	Valor de $\frac{p'}{p}$ para: Viento de 30 Kg; hielo que duplica el diámetro y multiplica el peso por 1,5
2	3,1416	2,344	3,131
2,5	4,9087	2,226	2,662
3	7,0686	2,159	2,363
3,5	9,6211	2,118	2,172
4	12,566	2,091	2,034
4,5	15,904	2,072	1,935
5	19,635	2,059	1,859
5,5	23,758	2,049	1,803
6	28,274	2,041	1,759
6,5	33,183	2,035	1,722
7	38,485	2,030	1,693
7,5	44,179	2,026	1,670
8	50,266	2,023	1,650
8,5	56,745	2,020	1,633
9	63,617	2,018	1,620

Comparando esta tabla con la anterior, se ve que el efecto de la nieve es mucho menor que el del viento, para diámetros inferiores a 6 milímetros. Por consiguiente, es inútil tenerlo en cuenta en este caso. Para los diámetros superiores, el efecto de la nieve es algo mayor que el del viento. Por esta razón los reglamentos no fijan más que el efecto del viento.

Conductores de aluminio. — Puede darse el caso de convenir el empleo de conductores de aluminio mejor que los de cobre. Para darse cuenta de la ventaja que puede resultar del empleo de uno u otro de estos dos metales, es muy cómodo hacer la comparación de sus características.

Conductibilidad eléctrica. — Si la conductibilidad eléctrica del cobre puro electrolítico se representa por 100, la del bronce generalmente utilizado en la construcción de los conductores es 98,5 y la del aluminio es 59. Por lo tanto:

$$\frac{\text{conductibilidad del aluminio}}{\text{conductibilidad del cobre}} = \frac{59}{98{,}5} = 0{,}6.$$

Resistencia mecánica. — La del bronce empleado en los conductores es de unos 45 kilogramos por milímetro cuadrado; la del aluminio es de 22 kilogramos.

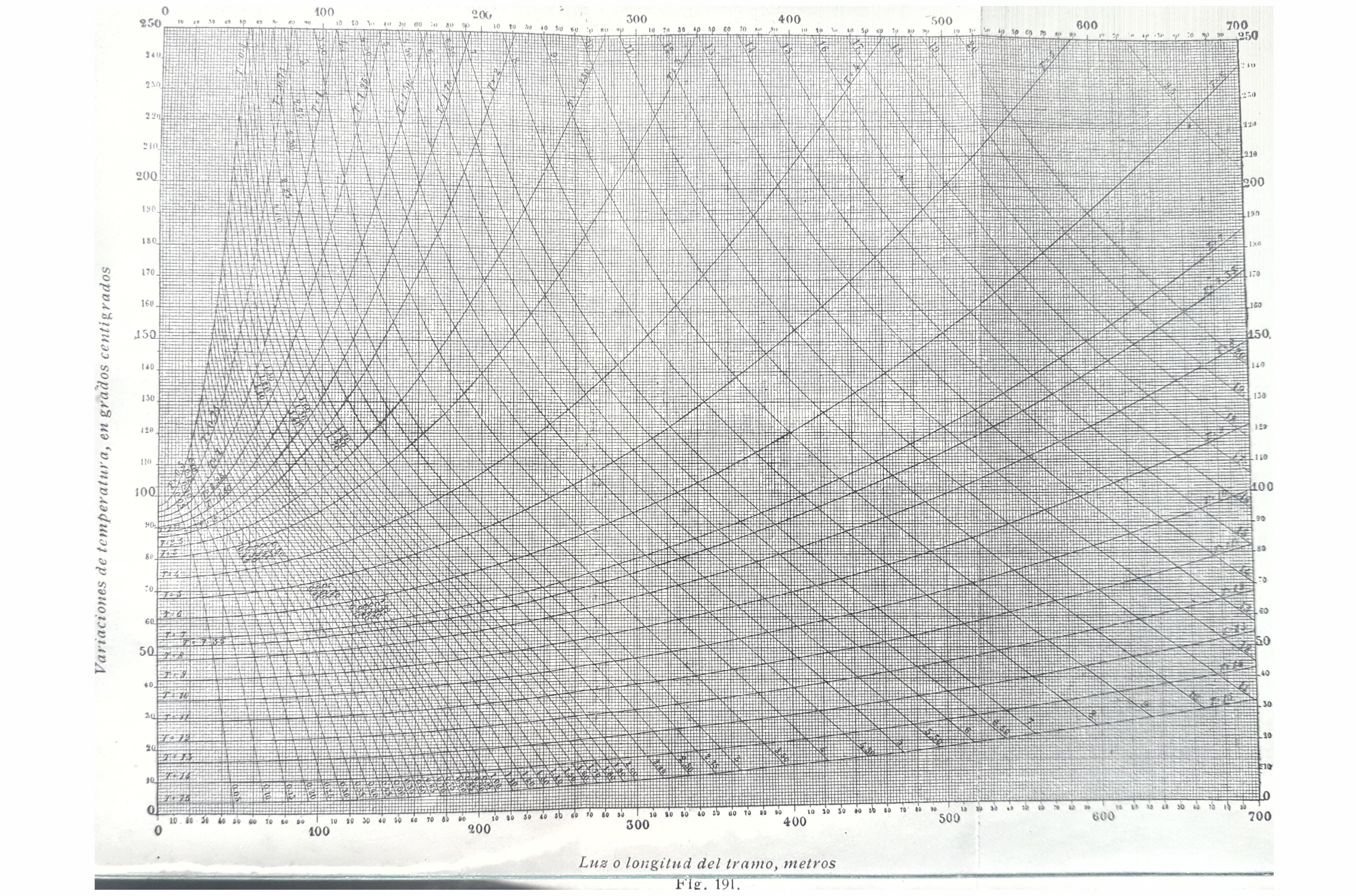
Peso específico. — 10 kilogramos por metro de hilo de un milímetro cuadrado de sección;

bronce: 0,0089; aluminio: 0,0027.

Relación entre los pesos de dos conductores de igual longitud y resistencia.

$$\frac{\text{Peso del aluminio}}{\text{Peso del cobre}} = 0{,}505;$$

es decir, que el peso del aluminio es aproximadamente



Variaciones de temperatura, en grados centigrados
Luz o longitud del tramo, metros

Fig. 191.

igual a la mitad que el del cobre; por lo tanto, resulta económicamente ventajoso el empleo del aluminio, siendo su precio menor que el doble del precio del cobre.

Relación entre las secciones de dos conductores que transportan una misma potencia en iguales condiciones. — Esta relación es igual a la inversa de la relación de las conductibilidades, o sea:

$$\frac{\text{sección aluminio}}{\text{sección cobre}} = \frac{98,5}{59} = 1,67.$$

Relación entre los diámetros. — Evidentemente, esta relación es:

$$\frac{\text{diámetro aluminio}}{\text{diámetro cobre}} = \sqrt{1,67} = 1,3.$$

Las ventajas y los inconvenientes que se encuentran en el empleo de estos dos metales se compensan de un modo muy aproximado, de modo que puede decirse que es una cuestión puramente de economía en el precio de la línea, la del empleo de una u otra clase de metal.

El aluminio tiene el inconveniente de ser de difícil soldadura, pero las uniones pueden asegurarse con empalmes, roblonados, o mejor aún con manguitos.

El montaje de las líneas, que resulta algo más fácil cuando se emplea el aluminio por el menor peso de este metal en comparación con el cobre, requiere ciertas precauciones: hay que evitar el tender el hilo sobre piedras o cuerpos duros, no arrastrarlo por el suelo, ni pasarlo rozando con hierros ni por la garganta superior de los aisladores, sino sobre poleas de madera suspendidas de las varillas de los aisladores. Las uniones de los cables con los aisladores deben hacerse con hilos de aluminio. etc., etc.

Ábacos de Dusaugey. — La determinación de luces, esfuerzos y flechas de una línea de aluminio, se hace

valiéndose de los ábacos de Dusaugey (figs. 191 y 192) del mismo modo indicado para las líneas de cobre con los ábacos de Blondel. Las abscisas son las luces: $^1/_4$ de mm por metro; las ordenadas son las variaciones de temperatura: $^1/_2$ mm por grado.

Las curvas de la figura 192 dan los valores de la relación $\frac{p'}{p}$, de una parte para un viento de 120 kilogramos por metro cuadrado ypara diferentes secciones del conductor, según que este conductor sea un hilo o un cable de 7, de 19 ó de 37 ramales; por otra parte da el valor de dicha relación para un viento de 30 kilogramos y también para las diferentes secciones del conductor, y si este es hilo o cable de 7, 19 ó 37 ramales.

Cruce de calles y caminos. — Cuando una línea aérea de transporte de energía atraviesa una calle, tiene que cumplir con las siguientes condiciones.

1.ª El ángulo que forma la línea con el eje de la calle ha de ser de 30° cuando menos; 2.ª la línea debe tener protectores convenientes (cuadros o redes) o tener otro hilo protector (cable portador) retenido por aisladores especiales.

Las redes protectoras se emplean con más frecuencia para el cruce de vías férreas. Sobre las calles se emplea más el cable portador, que es un hilo, generalmente de igual diámetro y clase que el de la línea, unido a ésta con ligaduras poco espaciadas. Los extremos del cable portador van fijados a aisladores de retención o amarre, colocados al lado de cada uno de los aisladores de línea. El número de aisladores queda así duplicado en cada poste de uno y otro lado de la calle.

Para el cruce de las vías férreas, el ángulo que la línea forme con los raíles debe ser cuando menos de 60°; su punto más bajo ha de estar a 7 metros por lo menos

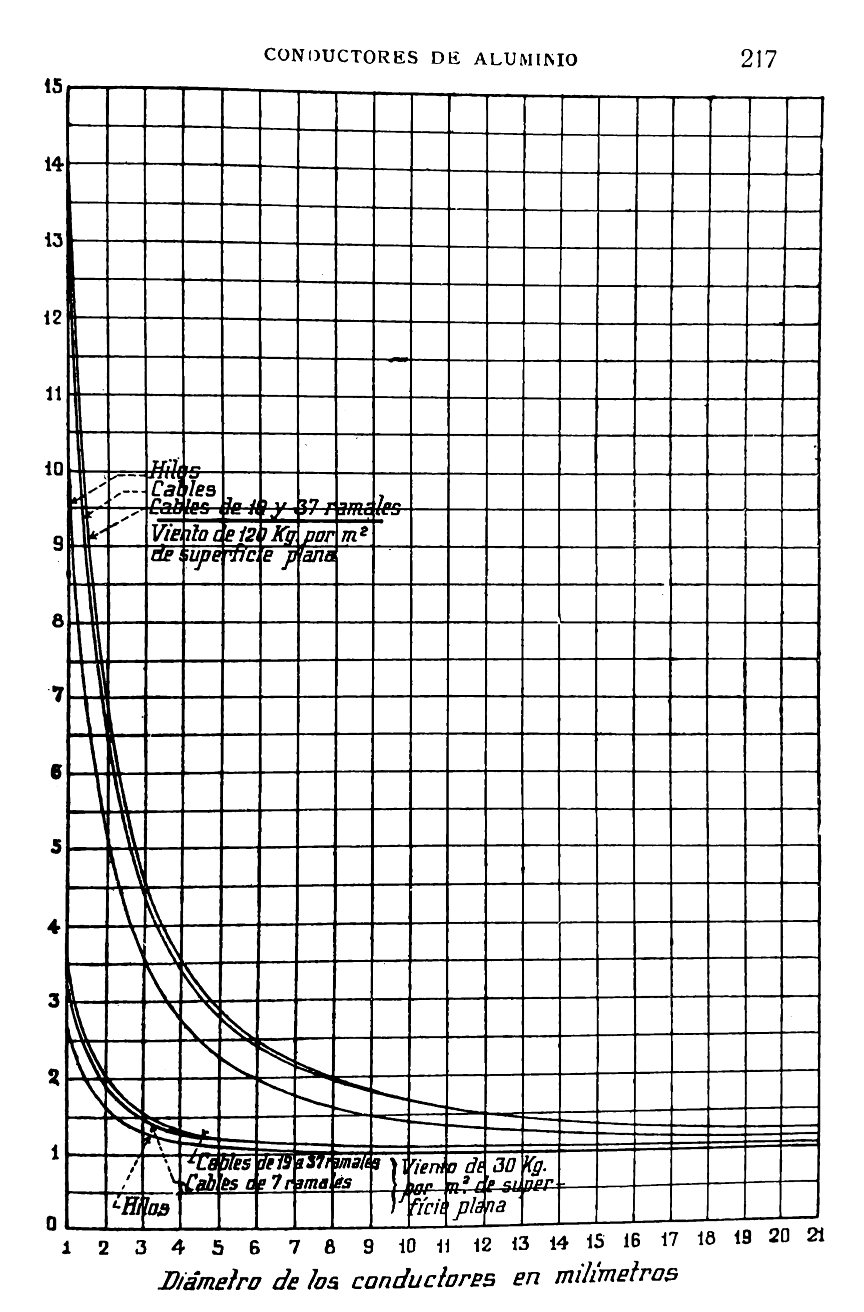

15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
Hilos
Cables
Cables de 19 y 37 ramales
Viento de 120 Kg por m²
de superficie plana
Cables de 19 a 37 ramales
Cables de 7 ramales
Hilos
Viento de 30 Kg.
por m.² de superficie plana
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21
Diámetro de los conductores en milímetros

Fig. 192.

sobre el raíl. Los postes deben estar empotrados en un bloque de fábrica: casi siempre son metálicos, porque los postes de madera únicamente se admiten para la baja tensión. El diámetro mínimo de los hilos es de 4 milímetros. La protección contra la caída de los conductores se obtiene con un cuadro metálico unido a tierra; este cuadro está constituído por piezas de hierro perfilado en forma de **U** o de **V** de tal modo que todo conductor que llegue a romperse caiga forzosamente dentro del mismo. El cuadro se fija en cada poste a 50 centímetros cuando menos por delante de los aisladores; cada aislador queda así duplicado, y la línea se amarra sobre los dos aisladores para cada hilo.

Para cruzar ríos navegables, la altura de la línea sobre el nivel de las aguas más altas es de 8 metros por lo menos; esta altura es de 3 metros, como mínimo, sobre las corrientes de agua no navegables.

En el punto de cruce de una línea que transporta energía, con una línea telefónica o telegráfica, la línea de energía debe pasar por encima de la otra, y entre las dos se establece un sistema de protección generalmente constituído por una red. Esta red está formada de mallas metálicas de unos 20 centímetros aproximadamente de lado, y está unida a tierra, pudiendo estar sujeta por los postes de la línea; debe estar a la distancia de un metro cuando menos, de todo conductor.

Cuando los aisladores de una línea están sometidos a esfuerzos laterales, por ejemplo, en un tendido en curva o en línea quebrada, hay que colocar en los aisladores un dispositivo de retención para que el hilo no pueda caer a tierra en caso de rotura del aislador.

Líneas telefónicas montadas sobre postes de una línea de energía. a) *Inversión de los hilos de la línea telefónica.* —Las corrientes en la línea de trans-

porte de energía producen en la línea telefónica tensiones indirectas que ocasionan perturbaciones en las transmisiones (trepidación). Se evitan estos inconvenientes cruzando a intervalo iguales y bastante próximos los dos hilos telefónicos, con lo cual tienden a producirse en cada parte de estos trozos corrientes inducidas de igual sentido y por consiguiente de sentido inverso en el circuito cerrado que forman estos hilos (figs. 193 y 194).

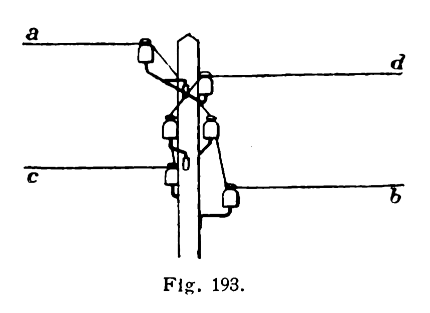
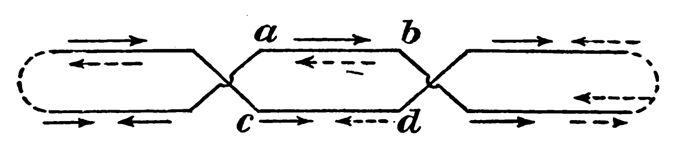


Fig. 193.

Línea de transporte de energía



Línea telefónica

——→ *Sentido de las corrientes inducidas en* ab *y* cd

---→ *Sentido en* ab *de la corriente inducida en* cd *y en* cd *de la corriente inducida en* ab

Fig. 194.

b) *Tensiones elevadas en los hilos de la línea telefónica.* — Estas tensiones se deben: 1.° a que la línea telefónica obra como el secundario de un transformador cuyo primario está representado por la línea de transporte de energía: 2.° a que la línea telefónica

obra también como la armadura de dos condensadores, uno formado con la línea de transporte de energía, y el otro con la tierra.

De aquí resulta que una línea telefónica debe considerarse en este caso como sometida a una tensión peligrosa, por lo cual debe estar montada sobre aisladores calculados para tensiones de 10000 volts.

Los aparatos receptores deben establecerse de modo que el personal de servicio quede libre de todo accidente que pudieran ocasionar estas tensiones: líneas muy bien aisladas a su llegada a las estaciones, interruptores de cuchillas manejables con pértiga, y pararrayos.

El aparato telefónico puede ser uno ordinario, derivado sobre el circuito secundario de un transformador cuyo primario esté derivado sobre la línea telefónica: sobre este circuito secundario se dispone también un pararrayos.

También se puede unir un aparato directamente a la línea con tal que todas las piezas metálicas del mismo estén a gran distancia del operador, pero en este caso hay que emplear tubos acústicos muy largos hechos de sustancias aislantes, con lo cual pierden claridad las transmisiones y recepciones.

APÉNDICE

REGLAMENTO

para instalaciones eléctricas, en cuanto afectan a la seguridad pública y a la servidumbre forzosa de paso

aprobado por Real Decreto de 27 de marzo de 1919
(*Gaceta de Madrid* del 3 de abril).

TÍTULO PRIMERO

CAPÍTULO PRIMERO

Instalaciones sometidas a concesiones administrativas

ARTÍCULO 1.° Se entiende por instalaciones eléctricas, en su acepción más general, todas aquellas en que interviene directa y principalmente la electricidad en cualquiera de sus formas.

ART. 2.° Son objeto de este Reglamento todas las instalaciones que puedan afectar a la seguridad pública y las que hayan de utilizar la servidumbre forzosa de paso con arreglo a la Ley de 25 de marzo de 1900.

ART. 3.° Las líneas aéreas, subterráneas o mixtas correspondientes a instalaciones eléctricas que por su establecimiento, conservación y explotación constantes han de gravar con servidumbre forzosa de paso el inmueble ajeno, en virtud de la Ley de 23 de marzo de 1900, previa la correspondiente indemnización al dueño del predio sirviente, necesitan declaración de utilidad pública y autori-

zación expresa otorgada y decretada por la Administración y quedarán sujetas a todo cuanto en este Reglamento se establece.

ART. 4.° No necesitan autorización administrativa las líneas e instalaciones anexas de uso particular que sólo graven la propiedad del que las quiera establecer o cuyos dueños le hubieren autorizado debidamente, ni aquellas otras que afecten sólo a bienes pertenecientes a las Diputaciones y Ayuntamientos, respecto a las cuales bastará con que se dé a la Administración cuenta detallada de ellas para su inscripción en el Registro de la industria y a los efectos de la inspección necesaria por lo que puedan afectar a la seguridad pública.

ART. 5.° Las líneas e instalaciones comprendidas en el artículo anterior, que a la vez afecten a zonas de servidumbre legal y obras del Estado, provinciales o municipales, terrenos de dominio público y zonas industriales y otras que se hallen sujetas a reglamentos especiales, necesitan también una autorización administrativa especial en lo referente a estas partes, quedando sujetas a todas las disposiciones de este Reglamento.

ART. 6.° Las instalaciones eléctricas que afecten a zonas militares, forestales, industriales, mineras y servicios a cargo del Estado, Provincia o Municipio, se sujetarán a las disposiciones especiales que en los mismos rijan, además de las generales de este Reglamento, e igualmente en el interior de las poblaciones a las Ordenanzas generales y locales de Policía urbana.

Las instalaciones telefónicas y telegráficas de carácter público se atendrán a las disposiciones de su Reglamento especial, y a este Reglamento en las precauciones de seguridad respecto a los cruces con los conductores de energía eléctrica de alta y media tensión y a la servidumbre forzosa de paso. Las líneas de comunicación, auxiliares de las de transporte o de otras instalaciones eléctricas, tendrán derecho a la imposición de servidumbre forzosa de paso, previa declaración de utilidad pública, al igual de cualquier línea eléctrica, a no ser que se instalen sobre los apoyos de la línea de transporte de la energía, en cuyo caso no necesitan especial declaración de utilidad pública, bastando la autorización competente.

ART. 7.° La declaración de utilidad pública para servi-

dumbre forzosa de paso y las concesiones y autorizaciones a que se refieren los precedentes artículos, se decretarán y otorgarán en cada caso en virtud de expediente administrativo, instruído y tramitado con sujeción a lo dispuesto en este Reglamento, a cuyas condiciones generales deberá subordinarse, sin perjuicio de las particulares que en la concesión puedan imponerse, por las especiales condiciones del sistema propuestas por el propietario.

CAPÍTULO II

De las concesiones y tramitaciones de expedientes

ART. 8.° Corresponde decretar la imposición de servidumbre forzosa de paso de corriente eléctrica y otorgar las autorizaciones cuando sea necesario obtenerlas para establecer instalaciones eléctricas:

1.° Al ministro de Fomento, cuando se trate de líneas conductoras de energía eléctrica que se extiendan a más de una provincia; cuando el informe de la Jefatura de Obras públicas, o de la verificación de contadores eléctricos no sea favorable a la autorización y cuando el gobernador de la provincia no esté conforme con la propuesta de la Jefatura para concederla o con cualquiera de las condiciones que en dichas propuestas se establecieran.

2.° Al gobernador civil de la provincia por delegación del ministro de Fomento en los demás casos.

3.° A las mismas autoridades corresponde autorizar las variaciones que se pretendan introducir en las obras o en las instalaciones ejecutadas a virtud de las autorizaciones por aquéllas otorgadas.

Así en los casos en que las autorizaciones se concedan por el Ministerio de Fomento, como cuando las otorguen los gobernadores, será facultad propia y exclusiva de los Ayuntamientos respectivos la determinación de la forma y condiciones a que habrán de acomodarse las instalaciones y líneas en el interior de las poblaciones en que hayan de establecerse, con respecto a las ordenaciones generales de este artículo.

ART. 9.° Cuando las instalaciones eléctricas en toda su acepción general afecten directa o indirectamente a terrenos de dominio público o a obras públicas, tales como

ferrocarriles, carreteras, caminos, cauces y canales y sus zonas de servidumbre de propiedad del Estado, la Provincia o el Municipio o revertibles a cualquiera de estas entidades, la resolución del ministro o del gobernador, según a quien corresponda, será única, abarcando todos los extremos en un solo expediente; pero si una o más de las partes que constituyan tales instalaciones generales no afectasen a dichos servicios, podrán agregarse las que como la distribución en el recinto de una población, etc., no se hallen relacionadas con lo que es de la incumbencia del ministro o gobernador; conceder o autorizar y tramitarlas en expedientes separados para facilitar ulteriores acuerdos parciales sobre variaciones y demás detalles fijados en este Reglamento.

ART. 10. El peticionario presentará su solicitud en el Gobierno civil de la provincia en la que se produzca la energía eléctrica o de donde parta la instalación, señalando en ella su domicilio en la capital, o en su defecto, el del representante que designe para que se le hagan todas las notificaciones necesarias. La petición podrá referirse a una, a varias o a todas las instalaciones en que tenga aplicación electridad «y deba ser regulado su uso». En esta solicitud será preciso acreditar el derecho a la energía de cuyo uso o aprovechamiento se trata y especificar la situación que ha de ocupar la instalación, así como los predios, pueblos y provincias a que afecte.

En el caso de que la concesión corresponda al ministro de Fomento, la petición se formulará a éste, y se presentará en el Gobierno civil de la provincia donde radique la instalación o el origen de la energía, acompañada de una instancia al gobernador civil solicitando se lleve a cabo la tramitación del expediente.

ART. 11. A toda petición de imposición de servidumbre forzosa de paso y autorización para instalaciones eléctricas deberá acompañar, además de lo especificado en el artículo anterior, el correspondiente proyecto que comprenderá los documentos siguientes:

1.° Memoria descriptiva o justificativa de la instalación, en la que se demostrará que todos sus elementos están proyectados con arreglo a los preceptos de este Reglamento y en la que se puntualizará su relación con todas las demás instalaciones que estuviesen en su zona

de influencia, haciendo especial mención de las líneas de comunicaciones y transportes que se crucen, vayan paralelas o se hallen a menos de veinticinco metros y de las disposiciones que se adopten para los cruces indicados u ocupaciones de vías de servicio general y terrenos de dominio público. En caso de líneas de transporte, se justificarán las causas que pueden obligar a que el trazado no sea en alineación recta, no admitiéndose en los poligonales ángulos interiores menores de 60° sexagesimales.

2.° Plano general de la instalación con el trazado de la línea en planta, en el que se marcarán los predios a que afecte y la situación de las instalaciones eléctricas a que se haya hecho referencia en la Memoria, así como la probable de las tuberías de conducción de aguas, líquidos, gases inflamables o corrosivos, cuando toda o parte de la instalación sea subterránea.

3.° Planos y perfiles de detalle junto a las viviendas y, especialmente, en la parte que afecte a vías y terrenos de dominio público que sean de uso público y a otras instalaciones eléctricas, telegráficas o telefónicas, así como de las estaciones centrales de protección, de transformación, de seccionamiento o de utilización, indicando también el sistema de postes, brazos, soportes y aisladores, si se trata de líneas aéreas.

4.° Presupuesto de todo cuanto ocupe terrenos de dominio público y, además, el general si la instalación ha de explotarse para servicio declarado público, en cuyo caso se acompañarán también las tarifas adoptadas y cuantos datos exige en su capítulo 8.° el Reglamento para la ejecución de la Ley general de Obras públicas de 1.° de julio de 1877, en la parte relativa a concesiones de dominio público y del Estado.

Los planos generales y de detalle se presentarán en escala tal que resulten manejables e inteligibles en todas sus partes; el trazado general en escala lo más de 1 : 5000 para las horizontales, y los de detalle en escalas que den lugar a dibujos que cumplan iguales condiciones que las indicadas para los planos generales.

ART. 12. Presentadas las instancias y datos a que se refiere el artículo anterior, se anotará la fecha y hora de entrega. En el término de tres días se pasará al ingeniero jefe de Obras públicas, quien en el de seis días deberá

manifestar si son o no suficientes para servir de base al expediente; y en este último caso, se devolverán los documentos presentados para su reforma o ampliación, pudiendo el peticionario recurrir en alzada a la Dirección general de Obras públicas, si no se conforma con lo resuelto por el gobernador. En este caso se le fijará un plazo para la rectificación.

ART. 13. Declarados suficientes los documentos presentados, el gobernador, en el término del tercer día desde que el ingeniero jefe haya redactado la correspondiente nota-anuncio, dispondrá su publicación en el *Boletín Oficial* de la provincia, y se abrirá una información pública, si procede, que durará treinta días, dentro de cuyo tiempo podrán formular reclamaciones las personas o entidades interesadas. La nota-anuncio deberá siempre comprender el nombre del peticionario, objeto de la petición, terrenos que atraviesa y sus términos municipales y concesiones conocidas a que pueda afectar la instalación. Cuando la instalación se refiera a otras provincias, se comunicará igualmente a los gobernadores respectivos, a fin de que lo anuncien del mismo modo. El referido anuncio se remitirá a los alcaldes de los pueblos correspondientes, a fin de que se fije en los sitios de costumbre durante el plazo de treinta días y además lo pongan en conocimiento de los particulares sobre cuyos predios se trata de imponer la servidumbre forzosa de paso, según la relación nominal presentada; igualmente lo pondrán en conocimiento de los dueños de las concesiones conocidas a que pueda afectar la instalación. Las reclamaciones se presentarán, dentro del plazo expresado, en la Jefatura de Obras públicas de la provincia, o ante los alcaldes respectivos. Los alcaldes, al terminar dicho plazo, remitirán una certificación de haber cumplimentado la publicación del anuncio, especificando si se han presentado o no reclamaciones, acompañándolas en el primer caso; igualmente certificarán sobre las citaciones que se hayan hecho y las incidencias a que tales citaciones hayan podido dar lugar; a estos documentos unirán el informe que estimen pertinente sobre los servicios municipales, si a ellos afectase la instalación, y si no, así lo manifestarán.

De las reclamaciones presentadas se dará cuenta al peticionario dentro de tres días, para que pueda contestar

en un plazo de veinte, si lo juzgase conveniente, o aceptarlas y alterar el proyecto.

ART. 14. En el caso de que la instalación solicitada afectase a obras y servicios del Estado dependientes de otros centros, como Telégrafos, Ferrocarriles, Canales, Puertos, Montes públicos, Explotaciones mineras, Zonas militares, etc., y también obras y servicios provinciales, deberá oirse a los respectivos jefes, cada uno de los cuales deberá informar en un plazo de diez días y proponer cuanto estimen necesario para la seguridad del servicio a su cargo. Con el fin de abreviar la tramitación, el peticionario podrá presentar en documentos especiales o duplicados de los del proyecto general, la parte que afecte a dichos servicios, y se procederá al trámite correspondiente a la vez que se verifica la información pública a que el precedente artículo se refiere.

ART. 15. Reunidos todos los documentos procedentes de la información y oído el peticionario, el ingeniero jefe, si no hay necesidad de reconocer todo o parte del terreno en que se desarrolla el proyecto objeto de la concesión, emitirá el informe sobre la solicitud y proyecto presentados y sobre las reclamaciones presentadas, en un plazo de diez días.

Si el ingeniero jefe considera indispensable el reconocimiento parcial o total, lo manifestará o justificará al gobernador en el término del tercer día, remitiéndole el presupuesto de gastos para que el peticionario consigne su importe en la Pagaduría de Obras públicas, en el término de quince días, a contar del de la notificación.

Una vez puesta a disposición del citado ingeniero jefe la cantidad presupuesta, practicará por sí o por otro ingeniero, en quien delegará al efecto, el mencionado reconocimiento, contando para esto con un plazo de treinta días desde la fecha indicada.

En casos contrarios, por importancia o dificultades del reconocimiento, se podrá prorrogar este plazo por otros treinta días como máximo.

Si el proyecto, por afectar a diferentes centros administrativos, exigiera el reconocimiento de Jefaturas distintas de la de Obras públicas, cada Jefatura efectuará el reconocimiento de lo que le es peculiar, sin que se repitan los reconocimientos de la misma parte por dos Jefaturas

distintas más que en el caso de afectar de una manera evidente a servicios diferentes y ser indispensable el reconocimiento del jefe encargado de cada una de ellas.

Los informes de las distintas Jefaturas se emitirán en un plazo que no excederá de quince días ante el gobernador, que lo trasladará a la de Obras públicas, para completar los antecedentes que han de preceder al suyo.

ART. 16. El gobernador, después de oír a la Comisión provincial y a la verificación oficial de contadores eléctricos sobre los puntos a que hace referencia el art. 1.° de las vigentes Instrucciones para la verificación de contadores, quienes deberán dictaminar en un plazo de diez días, resolverá en otro plazo igual si el acuerdo es de su competencia, o elevará el expediente con su informe al Ministerio de Fomento, ante el cual, en todo caso, podrá interponerse recurso de alzada contra la resolución del gobernador.

Las autoridades, entidades o corporaciones que no cumpliesen los plazos reglamentarios, serán responsables de los daños y perjuicios que por tal demora se causen al peticionario de la concesión, conforme a lo establecido en la Ley de responsabilidad de Empleados públicos de 5 de abril de 1904, sin perjuicio de las medidas que, por su parte, pueda tomar contra el remiso la autoridad superior.

ART. 17. Cuando la instalación afecte a varias provincias o dependencias y el peticionario nombre representantes en cada una de ellas, presentando además ejemplares del proyecto en número suficiente, el gobernador de la provincia donde se incoa el expediente remitirá con el anuncio un ejemplar del proyecto a fin de que se tramiten en todas las provincias simultáneamente y en iguales plazos y formas consignados en los artículos precedentes.

Si el peticionario no presentase más que un proyecto, y en alguna provincia de aquellas a que afecte la instalación fuese reclamado el conocimiento del mismo, el gobernador de la provincia que haya incoado el expediente podrá remitir aquél después del período de información, concediendo diez días a los reclamantes, contados desde el momento en que se les ponga de manifiesto, para ampliar reclamaciones o informes.

Los jefes de servicio se abstendrán en este caso de examinar las condiciones técnicas y se limitarán exclusivamente a lo que pueda afectar a los servicios a su cargo

y a las reclamaciones presentadas en su demarcación.

Una vez terminadas las informaciones, y en un plazo máximo de quince días, se remitirán con el proyecto al gobernador de la provincia en que se ha incoado el expediente, cuya autoridad, con todo lo concerniente a la de su mando, las elevará al Ministerio de Fomento.

Art. 18. Las instalaciones hechas con arreglo al art. 4.º de este Reglamento, en la parte referente a las zonas establecidas en el mismo, no necesitan información pública, y la tramitación se limitará a que en un plazo de diez días informen las Corporaciones provinciales y municipales en cuanto afecta a sus dependencias, lo mismo que los jefes que tengan a su cargo las obras y terrenos del Estado y de dominio público y la verificación oficial de contadores eléctricos de la provincia. Las instancias de instalaciones incluídas en el artículo 5.º de este Reglamento sólo deberán tramitarse respecto al dominio público conforme se establece en el presente Reglamento.

Art. 19. La fianza provisional que al solicitar la autorización deberá presentar el peticionario será del 1 por 100 del presupuesto de las obras en la parte que afecta al dominio público, y la definitiva que ha de otorgar el concesionario antes de comenzar sus trabajos en las obras o terrenos de dominio público será el 3 por 100 del citado presupuesto. Esta fianza responderá: en primer término, a los desperfectos que puedan originarse en las obras o terrenos de dominio público, y en segundo lugar, a los perjuicios que se produjeran a instalaciones anteriores eléctricas, de conducción de líquidos, gases, etc., sin perjuicio de las acciones que al Estado, entidades o particulares correspondan, cuando la cuantía de la fianza no baste a cubrir las responsabilidades. La devolución de la fianza se hará al terminar las obras, si éstas satisfacen las condiciones corrientes y no se hubiese presentado reclamación alguna, justificando esto último con certificados de los alcaldes.

Art. 20. La indemnización previa establecida en el artículo 1.º de la Ley de 23 de marzo de 1900 y en el 3.º de este Reglamento, por la superficie del terreno ocupada por los postes, si es línea aérea, y por las zanjas, si es subterránea, se abonará al dueño del predio sirviente por el que obtenga a su favor la servidumbre, sin que en ningún caso pueda exceder el valor de ambas servidumbres reunidas

del justiprecio que tenga una faja de terreno de dos metros de anchura, entendiéndose que la indemnización da el derecho, a quien la paga, a la servidumbre de paso exclusivamente.

ART. 21. Con arreglo al artículo 29 de la Ley de Expropiación forzosa, caducarán las concesiones de servidumbre forzosa de paso otorgadas para establecer las conducciones de energía eléctrica en los casos siguientes:

1.° Cuando no se principien o no se terminen las obras dentro de los plazos fijados en la concesión, debiendo la Administración incoar de oficio el expediente de caducidad si dentro del plazo fijado en la concesión los concesionarios no justifican las causas por las cuales no se hubieran cumplido aquellos extremos.

2.° Por incumplimiento de las condiciones y objeto de las obras concedidas.

3.° Por el no uso, sin causa justificada, durante un plazo de nueve años desde que se interrumpió el servicio.

4.° Por todos los motivos consignados en la Ley de Obras públicas de 1877.

ART. 22. Los concesionarios podrán, sin embargo de lo dispuesto en el artículo anterior, solicitar prórrogas de los plazos para empezar o terminar las obras, y el ministro o gobernador que hubiesen concedido aquéllas, autorizar prórrogas, siempre que se pidan antes de que expiren los plazos reglamentarios de referencia, cuando haya justa causa de fuerza mayor, y sin que en ningún caso la prórroga o el total de prórrogas pueda exceder de otro plazo igual al impuesto en la concesión.

ART. 23. Serán de cuenta del concesionario, además de las obras necesarias para la instalación de la línea proyectada, las de la conservación de la misma. El concesionario podrá ser autorizado para ocupar temporalmente los terrenos indispensables para el depósito de materiales, previa la indemnización de daños y perjuicios o fianza suficiente en el caso de no ser éstos fáciles de prever, o cuando no se conformen con su aprecio los interesados. Los dueños de los predios o la Administración podrán compeler al concesionario a ejecutar las obras que para evitar accidentes estime oportunas el ministro de Fomento.

ART. 24. La concesión de servidumbre forzosa de paso de corriente eléctrica establecida no obsta para que el

dueño del predio sirviente pueda cercarlo en concepto de anexo, como antes se dice, así como edificar, dejando a salvo la servidumbre y el medio de atender a la conservación y reparación exceptuada por dicha servidumbre.

En casos como éste el propietario tendrá derecho a exigir el cambio de trazado fuera del espacio que ocupe la nueva edificación, siendo de su cuenta los gastos materiales que el cambio de la línea ocasione, o los gastos materiales para la colocación de la nueva línea, y siempre que la variación de trazado no exija un aumento de longitud del 20 por 100 sobre la parte variada.

ART. 25. La concesión de servidumbre forzosa de paso de corriente eléctrica sobre predios ajenos caducará, desde luego, al declararse la caducidad de la autorización o concesión, según se establece en el artículo 21 de este Reglamento, y en caso de no hacerse uso de ella durante nueve años, que empezarán a contarse desde la fecha en que el dueño del predio sirviente cobró la valoría con arreglo al artículo 11 de la Ley de 23 de marzo de 1900.

TÍTULO II

De las reglas técnicas y condiciones generales de las instalaciones

CAPÍTULO PRIMERO

De la disposición general e instalaciones de fábricas de producción y estaciones centrales

ART. 26. En armonía con lo dispuesto en el artículo 10 de este Reglamento, el peticionario podrá proponer el sistema de producción, conducción, transformación y distribución que considere más conveniente, siempre que para la seguridad de las personas, cosas y otras instalaciones adopte las medidas propias de cada sistema y se sujete a las prescripciones generales de este Reglamento. La Administración podrá admitir o rechazar la propuesta, según que ésta satisfaga o no las condiciones de seguridad antes mencionadas, y teniendo en cuenta si las precauciones adoptadas son suficientes para la tensión, corriente y condiciones de los locales de la instalación proyectada.

Según la tensión que se emplee, las instalaciones, máquinas y aparatos, se dividirán en la forma siguiente:

De baja tensión, cuando la mayor diferencia de potencial que exista entre un conductor y tierra no pase de 175 volts en corriente continua o 125 volts eficaces en alterna.

De media tensión, cuando dicha diferencia de potencial esté comprendida entre los límites antes mencionados y 1000 volts en corriente continua y 600 en alterna.

De alta tensión, si la misma diferencia de potencial es mayor de 1000 volts en corriente continua y 600 en alterna.

ART. 27. En todas las máquinas generadoras o receptoras de media o alta tensión deberán ponerse en perfecta comunicación con tierra las partes metálicas que no deben tener contacto con los circuitos eléctricos, tales como núcleos, soportes, etc., no considerándose como suficiente medida de precaución el uso de plataformas aisladas, dispuestas alrededor de dichas máquinas. Asimismo deberán ponerse a tierra las envolventes o partes metálicas, distintas de los conductores, en los aparatos eléctricos que por su naturaleza o condición deban ser manejados por el personal de la instalación o puedan ser tocados inadvertidamente.

Los conductores de los circuitos de media tensión al alcance de personas extrañas al servicio, tendrán el suficiente aislamiento para que no ofrezcan peligro al ser tocados accidentalmente, y los de alta tensión, aun cuando sean aislados, deberán estar instalados de modo que por su posición o por medio de protecciones especiales, haga imposible todo contacto. Las separaciones entre los distintos conductores será tal que, teniendo en cuenta la diferencia de potencial que entre los mismos existía, no pueda determinarse una ruptura del dieléctrico entre ellos.

En las instalaciones de baja tensión no es necesaria ninguna precaución especial en los generadores o receptores, a menos de que, por circunstancias particulares, sean de temer sobretensiones que puedan elevar la diferencia de potencial entre un conductor y tierra a un valor mayor que el límite asignado a la baja tensión; únicamente los conductores de los circuitos al alcance de la mano deberán estar recubiertos.

En toda central eléctrica los aparatos de medida, segu-

ridad o maniobra, tanto mecánicos como eléctricos, deberán estar colocados en sitios que permitan la fácil lectura de aquélla, o el rápido manejo de los segundos, en caso de accidente.

ART. 28. Los locales donde se instalen transformadores deberán ser secos, bien ventilados y no ofrecer peligro de incendio o de explosión.

En las centrales de producción o transformación de energía eléctrica o en los locales destinados únicamente a usos industriales en que aquélla se utilice, los transformadores en los que unos o ambos circuitos sean de alta tensión, deberán colocarse en lugares, locales o compartimientos donde únicamente se permite la entrada a las personas expertas o advertidas del peligro. Las envueltas metálicas de los transformadores deberán ponerse en comunicación con tierra, y los interruptores se instalarán de modo que la corriente pueda ser cortada al entrar en dichos compartimientos. Cuando el secundario de un transformador esté conectado a una distribución de baja tensión, alimentada al mismo tiempo por otros transformadores, deberá advertirse de modo bien visible a los operarios que se abstengan de tocar aquél sin haber cortado la corriente no sólo del primario, sino también del secundario. Para los transformadores de medida bastará que se monten de modo que no puedan ser tocados inadvertidamente.

Cuando para la instalación de transformadores de alta tensión se empleen casetas, quioscos, garitas o pozos subterráneos, no deberá colocarse en dichos locales más que los transformadores y los aparatos a ellos anejos, y debe hacerse la instalación en la misma forma que en las centrales mencionadas en el párrafo anterior. Si los quioscos o las tapas de los pozos subterráneos fueran metálicos, deberán estar en buena comunicación con tierra; pero esta comunicación será independiente de la unión a tierra de las envueltas metálicas de los transformadores, de forma que dichas envueltas no comuniquen eléctricamente con el quiosco o con la tapa sin la intervención de tierra.

Los transformadores de pequeña potencia podrán montarse también al aire libre sobre postes, plataformas o palomillas, siempre que las envueltas metálicas estén a tierra y su elevación sobre el piso sea al menos de cinco metros. Las distancias de los conductores de alta al suelo y

a las fachadas serán las que se marcan en los artículos 39 y 40 de este Reglamento, y el aviso de peligro por causa de alta tensión deberá colocarse en forma clara y visible.

No se permitirá la instalación de transformadores de media y alta tensión en los edificios habitados, salvo los que se mencionan en el párrafo segundo de este artículo, a menos de que en ellos se disponga de un local que reúna las condiciones generales que se han indicado y los transformadores sean inaccesibles para las personas extrañas al servicio.

ART. 29. El propietario o concesionario de una instalación podrá adoptar el sistema y disposiciones que juzgue más convenientes al funcionamiento de la fábrica y seguridad personal; pero antes de ponerla en explotación deberá entregar a la Administración, por duplicado, un plano o esquema de aquéllas y la reglamentación del servicio, para su examen por la Verificación oficial de contadores eléctricos de la provincia, en cumplimiento del artículo 1.º de las instrucciones de este servicio, y si no se presentan reparos en un plazo de diez días, se considerarán aprobados, debiendo colocar un ejemplar en sitio visible de la instalación para conocimiento del personal afecto al mismo.

En dicho Reglamento se deberá prohibir el acceso al público, a no ir acompañado de un operario experto o del fabricante. Se exceptúa al verificador o agente de la Administración encargado de la inspección del cumplimiento de las condiciones de la concesión, el cual, sin embargo, no podrá proceder a ninguna verificación o comprobación sin previo aviso al concesionario y la asistencia de éste o un delegado suyo.

Cuando para la producción de energía eléctrica se empleen máquinas de vapor u otros motores sujetos a ordenanzas y disposiciones especiales, deberán satisfacer a las mismas en su instalación y funcionamiento, independientemente de cuanto respecto a la energía eléctrica se dispone en este Reglamento.

CAPÍTULO II

De las líneas de conducción de energía eléctrica

ART. 30. En las instalaciones de producción, transformación y utilización de energía eléctrica, cualquiera que

sea la tensión empleada, deberán colocarse interruptores:

a) En los conductores que conecten el inducido de cada generador o conmutatriz con el cuadro de distribución, y en los correspondientes al introductor, salvo el caso de que la corriente de este circuito pueda ser interrumpida en el reóstato de excitación.

b) En los conductores de unión con las baterías de pilas o acumuladores.

c) En las distintas arterias de alimentación o líneas de transporte que partan de las centrales.

d) En la alimentación de motores, y cuando éstos tengan que ser excitados por distinta corriente, en los circuitos de excitación, salvo el caso exceptuado en el apartado *a)*. También podrá suprimirse el circuito de alimentación cuando el reóstato de arranque interrumpa la corriente en todos los conductores conectados al motor.

e) En los circuitos primarios y secundarios de cada transformador o grupo de transformadores que deban trabajar simultáneamente. En el caso de que el circuito de utilización esté conectado únicamente con el secundario de un solo transformador o con los secundarios de un solo grupo de transformadores, en cuyos primarios se interrumpa la corriente por un mismo interruptor, podrá suprimirse el del secundario. También podrá dispensarse el interruptor en los transformadores de medida.

f) En general, en el circuito de cada receptor o grupo de receptores que deban funcionar al mismo tiempo.

Los interruptores empleados en estos circuitos deberán estar dispuestos de modo que se establezca o se interrumpa la corriente a la vez en todos los conductores de un mismo circuito. Se exceptuarán de esta regla los circuitos de baja tensión cuya intensidad no pase de seis amperes; en ellos se tolerarán los interruptores unipolares.

En todos los conductores de las instalaciones antes mencionadas, excepción hecha de los que luego se expresan, se colocarán cortacircuitos automáticos o fusibles, que interrumpan la corriente en el circuito en que aquélla haya llegado a un valor excesivo; si los cortacircuitos pueden maniobrarse, además, como interruptores, permitiendo cortar fácilmente y a voluntad la corriente, podrán dejarse de colocar los interruptores indicados anteriormente.

No se colocarán cortacircuitos en los conductores de

unión entre las máquinas y transformadores acoplados en paralelo, en los de conexión a tierra, ni en los neutros; sin embargo, se permitirá su empleo en las derivaciones de los neutros que formen con otro conductor activo circuitos destinados a alimentar un receptor o grupo de receptores.

Los cortacircuitos automáticos deberán cortar la corriente a la vez en todos los conductores de cada circuito y, si se emplean fusibles, todos los de un mismo circuito deberán estar graduados para la misma corriente.

En los principales circuitos de las instalaciones de importancia se preferirán a los fusibles los cortacircuitos automáticos que permiten una mayor exactitud en la valoración del límite máximo de corriente, y mejor aún, los cortacircuitos diferidos (a relais) que ofrecen la posibilidad de hacer, cuando estén graduados convenientemente, que no se interrumpa la corriente en todos los circuitos a la vez, evitando de este modo las grandes sobretensiones a que esto da lugar. En los motores que necesiten una gran corriente de arranque se preferirá también el empleo de cortacircuitos diferidos.

Los interruptores y cortacircuitos empleados deberán llenar las siguientes condiciones:

a) Ser de tipo y dimensiones apropiados a la tensión de servicio y a la corriente que deba interrumpir, de modo que no persista el arco formado al cortar el circuito ni la densidad de corriente en las superficies de contacto que pueda dar lugar a elevaciones exageradas de temperatura. Todo interruptor o cortacircuito deberá llevar inscritas la tensión e intensidad máxima a que deba ser empleado.

b) Los interruptores se montarán sobre soportes incombustibles y de modo que puedan ser manejados con facilidad y sin peligro. Si han de ser movidos a mano, el mango, palanca o parte que ha de ser tocada para su maniobra será de materia aisladora. Si los interruptores fueran de alta tensión, dicha parte deberá estar separada de las que están a esta alta tensión por un tabique aislador, como el mármol del cuadro de distribución u otra disposición análoga.

c) En los interruptores de aceite, de alta tensión, en los montados en la forma indicada en el párrafo anterior o los que por cualquier causa no fuesen bien aparentes sus

disposiciones de cierre y ruptura deberán señalarse de modo que no puedan confundirse.

d) Los cortacircuitos automáticos o fusibles deben ser establecidos de modo que corten la corriente cuando ésta llegue al valor máximo que pueda admitirse en las máquinas, aparato receptor o conductor que deba proteger. Este valor máximo de la corriente debe ser, a lo sumo, 1,50 de la corriente normal.

e) Los cortacircuitos deben montarse también sobre soportes incombustibles, y los de alta tensión de modo que no puedan tocarse inadvertidamente y su manejo no ofrezca peligro. Los fusibles deberán estar además cubiertos de modo que no puedan proyectar el metal fundido.

En las líneas de transporte de gran longitud, que deberán estar divididas en trozos o secciones de veinte kilómetros, a lo sumo, se separarán estas secciones por medio de interruptores o desconectadores que, para mayor seguridad, deberán poner en comunicación con tierra al abrirse el trozo de línea que quiera separarse. Para el manejo de estos desconectadores se tomarán las necesarias precauciones a fin de que aquél no resulte peligroso.

En las redes de distribución se dispondrán cortacircuitos fusibles en los puntos de unión de las arterias y los distribuidores y en todos los sitios necesarios, para que nunca pueda pasar por un conductor una corriente mayor de la que éste puede soportar, según su sección.

Siempre que por la naturaleza, potencia y extensión de la instalación, sean de temer sobretensiones de importancia, cualquiera que sea la causa que las pueda producir, se instalarán descargadores en comunicación con tierra, o limitadores de tensión de reconocida eficacia. Especialmente en las líneas aéreas deben precaverse las perturbaciones que puedan ser producidas por la electricidad atmosférica, debiendo colocarse descargadores o limitadores de tensión en cada uno de los trozos en que la línea se haya dividido, cuando ésta sea de gran longitud.

ART. 31. Los conductores de energía eléctrica podrán ser de cobre, aluminio, bronce u otros materiales, siempre que para las líneas aéreas su resistencia mecánica satisfaga las condiciones que se exigen más adelante. Las densidades de corriente admitidas en este artículo se refieren al cobre como tipo de conductor más usado. La den-

sidad de corriente admitida en un conductor de materia distinta al cobre se fijará teniendo en cuenta la temperatura; al efecto, se admitirá que esta temperatura es igual en un conductor cualquiera y otro de cobre de la misma sección, cuando las densidades de corriente estén en razón inversa de las raíces cuadradas de las resistencias específicas de ambos.

Las máximas densidades de corriente por mm² que podrán admitirse en los conductores de cobre de 1,65 a 1,70 microohms/cm., serán:

a) Conductores desnudos:

Secciones	Canalizaciones en locales cerrados	analizaciones al aire libre
2 mm²	6,00	9,25
4 »	5,00	8,50
6 »	4,50	7,75
8 »	4,00	7,25
10 »	3,75	6,75
12 »	3,60	6,25
15 »	3,50	5,90
20 »	3,35	5,50
25 »	3,20	5,25
30 »	3,00	5,00
40 »	2,75	4,75
50 »	2,50	4,50
60 »	2,35	4,25
70 »	2,25	4,00
85 »	2,10	3,75
100 »	2,00	3,60

En conductores donde el régimen de corriente sea muy variable, no alcanzándose el máximo de la misma más que durante cortos intervalos de tiempo, los valores anteriores podrán ser aumentados hasta un 20 por 100.

En los conductores desnudos de mayor sección, montados sólidamente sobre soportes incombustibles, la densidad de corriente estará sólo limitada por la condición de que la elevación de temperatura no sea perjudicial para la conservación del conductor, para las personas ni para los objetos próximos al mismo.

b) Hilos y cables cubiertos en canalizaciones aéreas:

Sección	Densidad máxima
2 mm²	6,00
4 »	5,00
6 »	4,50
8 »	4,00
10 »	3,75
12 »	3,60
15 »	3,50
20 »	3,35
25 »	3,20
30 »	3,00
40 »	2,75
50 »	2,50
60 »	2,35
70 »	2,25
85 »	2,10
100 »	2,00
120 »	1,85
150 »	1,75
185 »	1,60
240 »	1,50
300 »	1,40
400 »	1,25
500 »	1,18
650 »	1,10
850 »	1,05
1 000 »	1,00

Como en los conductores desnudos, podrán aumentarse estos valores en la misma proporción cuando el régimen de corriente sea muy variable.

c) Cables subterráneos de un solo conductor para corriente continua:

Sección	Densidad máxima
15 mm²	8,00
25 »	6,80
35 »	6,00
50 »	5,20

Sección		Densidad máxima
70	»	4,50
100	»	4,00
125	»	3,70
150	»	3,40
200	»	3,00
250	»	2,75
300	»	2,50
400	»	2,25
500	»	2,05
650	»	1,90
800	»	1,75
1.000	»	1,60

d) Cables subterráneos de varios conductores:

Secciones mm²	De dos conductores	De tres conductores	De cuatro conductores	Concéntricos: De dos conductores	Concéntricos: De tres conductores
10	7,00	6,50	5,70	7,00	5,50
16	5,90	5,30	4,70	5,60	4,70
25	5,00	4,40	4,00	4,80	4,00
35	4,30	3,80	3,40	4,10	3,40
50	3,80	3,30	3,00	3,60	3,00
70	3,30	2,85	2,65	3,10	2,60
100	2,90	2,60	2,30	2,80	2,30
125	2,60	2,25	2,00	2,65	2,10
150	2,40	2,10	1,90	2,40	1,95
200	2,15	1,90	1,75	2,15	1,75
250	1,95	1,75	1,55	1,95	1,60
300	1,75	1,60	1,40	1,75	1,45
400	1,60	1,40	1,25	1,60	1,30

En los cables subterráneos de más de 3000 volts se reducirán los valores anteriores en un 10 por 100.

En el caso de que varios cables vayan juntos, se reducirán a un 75 por 100 las densidades admisibles en todos los tipos de cables enunciados.

Los empalmes y uniones de hilos y cables se harán de

forma que la elevación de temperatura en ellos no sea mayor que en los conductores que se empalman.

En las líneas y redes, los conductores de alta y media tensión, aunque estén recubiertos de materia aisladora, se colocarán de modo que por su posición o instalación no puedan ser tocados inadvertidamente, y si están protegidos por envueltas metálicas éstas deberán ponerse a tierra. Los de baja tensión, si son recubiertos, no necesitan de ninguna protección especial. Los de alta y media tensión que vayan colocados de modo que sea posible su contacto, deberán ir protegidos por una cubierta metálica puesta a tierra.

ART. 32. Para los aislamientos empleados en las instalaciones se tendrán en cuenta las prescripciones que a continuación se expresan:

a) Las máquinas y transformadores deberán haber satisfecho a las condiciones de rigidez dieléctrica de sus aislamientos exigidas por las prescripciones internacionales, hasta que se publiquen las españolas, para la recepción de maquinaria.

b) Los aisladores de las instalaciones aéreas de media y alta tensión deberán haber sido ensayados, con el fin de comprobar su rigidez dieléctrica a las siguientes tensiones:

En seco.—Los de media a 1000 volts más 4 veces la tensión de servicio.

Los de la alta tensión hasta 10000 volts a una tensión igual a 5000 volts más 3 veces la de servicio.

De 10000 a 30000 volts, a una tensión igual a 15000 volts más 2 veces la de servicio.

De 30000 a 70000 volts, a una tensión igual a 1 $^1/_2$ veces la tensión de servicio más 30000 volts.

Para mayores tensiones se hará un estudio especial que justifique la suficiencia de las condiciones dieléctricas.

Bajo lluvia.— Los aisladores se someterán bajo lluvia, de 3 mm. por minuto y con inclinación de 45°, a tensiones de 40 por 100 de las indicadas en el párrafo anterior para los ensayos en seco.

c) Cuando los aisladores de las líneas, por su situación, estén expuestos a depósitos salinos, de polvo o de otra naturaleza que disminuyan sus condiciones de aislamiento, se reforzarán éstos según aconsejen las circunstancias.

d) Los cables acorazados para líneas y redes subterráneas deberán haber resistido durante quince minutos, después de veinticuatro horas de inmersión en el agua, las siguientes tensiones:

Tensión á que han de emplearse		Tensión de ensayo
Hasta 1000 volts		3,00 veces
De 1000 a 5000 íd.	1000 +	2,00 veces
De más de 5000 íd.	3500 +	1,50 veces

ART. 33. Queda prohibido en toda clase de conducciones eléctricas el uso de cañerías y el de la tierra para cerrar el circuito, salvo los casos especificados en este Reglamento. Sólo accidentalmente, para una reparación urgente, podrá utilizarse la vuelta por tierra siempre que su empleo no ofrezca peligro ni dé lugar a perturbaciones en otros servicios.

ART. 34. En las instalaciones subterráneas, los conductores se colocarán a una profundidad mínima de 60 cm. y a una distancia de 50 cm. al menos de las tuberías de agua, gas o de otros servicios preexistentes, ya sigan la misma dirección o se crucen. Esta separación se elevará a un metro con relación a los cables destinados a las comunicaciones telegráficas o telefónicas. En las calles, carreteras y demás vías de carácter público se colocarán los conductores fuera de la zona destinada al servicio de rodadura y máxima circulación del público, siempre que haya posibilidad.

Los cables armados de alta o baja tensión pueden colocarse enterrados sin más precaución que la de guardar las distancias consignadas en el párrafo anterior. En las instalaciones con hilo neutro, éste deberá ponerse a tierra, siempre que sea posible, y en este caso los conductores neutros deberán ser desnudos.

Las líneas aéreas de tensiones superiores a 5000 volts serán ensayadas después de construídas, a una tensión con respecto a tierra igual a una y media veces la tensión de servicio, debiendo hacerse este ensayo con la línea aislada y desconectando los pararrayos y limitadores de tensión. Podrá eximirse de esta prueba cuando lo autorice la Direc-

ción general de Comercio, Industria y Trabajo, oyendo a la Comisión permanente española de Electridad.

Las instalaciones en galerías o alcantarillas por las que pueden transitar personas, se considerarán como aéreas a los efectos de este Reglamento, salvo en lo que se refiere a las distancias de los conductores al suelo y a la fachada.

El aislamiento de las instalaciones interiores de baja tensión será suficiente para que las derivaciones a tierra de corriente, de cualquier conductor, entre dos cortacircuitos, o después del último cortacircuito, no pase de un miliamper.

ART. 35. En las cajas o registros de las conducciones subterráneas no se consentirá cañería alguna de agua, gas u otros servicios, y estarán dispuestos dichos registros en condiciones de poder ser ventilados fácilmente. Las tapas de estos registros podrán ser de piedra, de hormigón, de cemento o de materias aisladoras, y también metálicas; pero en este último caso, y en general si hay alguna parte metálica, ésta no podrá hallarse en comunicación eléctrica con los conductores, y para evitar accidentes deberá tener buena comunicación con tierra. Deberán tomarse, además, las disposiciones necesarias para impedir la aglomeración de agua y gas en los registros y su acción sobre los conductores y tapas.

ART. 36. Los trazados de las líneas aéreas sobre vías públicas se situarán fuera de la parte destinada a rodadura y donde sea menos frecuente el tránsito de personas, subordinándose en las partes urbanizadas a lo que dispongan las Ordenanzas municipales, y en su defecto, a lo que especialmente determine la autoridad que otorgue la concesión o permiso para la seguridad de las personas y facilidades del tránsito.

En las zonas urbanizadas y fuera de vías públicas, el trazado de las líneas será rectilíneo preferentemente, y sólo por imposibilidad de cumplir esa condición, se establecerán trazados poligonales, evitando, en cuanto las circunstancias lo permitan, cambios bruscos de dirección.

ART. 37. Los apoyos de las líneas y de otras instalaciones aéreas pueden ser obras de fábrica de carácter permanente, columnas de cualquier forma de construcción, siempre adecuada al objeto a que se destinen, postes metá-

licos, de hormigón, de madera o mixtos, pudiéndose combinar todos estos sistemas.

Dentro de las poblaciones y en todos los casos en que sea preciso tener en cuenta determinadas condiciones de ornato, el material de los apoyos y forma se armonizarán con aquéllas, sujetándose a las Ordenanzas municipales, si las hubiere. Si las líneas o instalaciones han de existir sobre otras preexistentes, muros, edificios, etc., mediante ménsulas, palomillas, bastidores u otras construcciones, será preciso el permiso previo del dueño de la edificación que se afecte, y en caso de ser aquéllos metálicos y llevar líneas de media y alta tensión, se comunicarán eléctricamente con tierra.

La altura de los apoyos será la necesaria para que el conductor más bajo de la línea, tendidos todos en la flecha de la catenaria que corresponde al vano, quede, sobre cualquier punto del terreno que cruza, a una altura mínima de seis metros, excepción hecha de puntos inaccesibles para las personas, donde se podrá reducir la altura a cuatro metros, o de aquellos sitios en que, por sus condiciones especiales, sea precisa mayor altura, la cual, en cada caso, será determinada por la entidad que conceda la instalación.

La resistencia del apoyo y de su empotramiento serán tales que, supuesto un viento normal a la línea (125 kilogramos de presión por metro cuadrado), la acción del mismo sobre los elementos que la integran no sea suficiente para producir una flexión o deformación permanente en el poste o apoyo que la soporta. Se supondrá el esfuerzo soportado por los hilos en el punto de sujeción del superior y la acción del viento normal a la dirección de la línea y aplicada en el centro del vano.

Para variaciones de dirección que representen ángulos de 20° en adelante, se calculará el apoyo tomando el esfuerzo resultante de todos los que actúan sobre él. Los ángulos de 5 a 20° se considerarán como de 20°. Los postes de anclas se calcularán para un esfuerzo igual a 2/3 del máximo que deban sufrir en una dirección, suponiendo que no exista contrarresto alguno. Los de cabeza y final de línea se calcularán por el máximo esfuerzo total.

En el sentido longitudinal del trazado de la línea, la resistencia de los apoyos se calculará para un esfuerzo de

tracción unilateral igual a $1/m$ de la carga de rotura del total de los conductores que han de soportar aquellos apoyos, teniendo presente que, en dichas condiciones, el coeficiente de seguridad no será inferior a cuatro, suponiendo todo el esfuerzo referido al punto de sujeción del conductor superior.

Para valor de m se tomará el que corresponde en el siguiente cuadro al diámetro y número de conductores empleados.

VALORES DE m

Diámetro en mm.	Número de conductores de la línea			
	2	3	4	6
3	4,0	4,8	5,3	6,0
4	5,0	5,4	6,6	7,5
5	6,6	7,9	8,8	9,9
6	8,6	10,0	11,5	13,0
7	10,6	12,7	14,1	15,9
8	12,0	14,4	16,0	18,0

En las líneas de conductores de diámetros intermedios se tomará el inmediato superior.

En los ángulos por cambio de alineación, por ser permanente el esfuerzo que tiende a derribar los apoyos, las condiciones de resistencia se aumentarán teniendo en cuenta el mayor esfuerzo que el ángulo determina, para evitar deformaciones que por la acción del tiempo pueden producirse.

En el sentido de la compresión resistirán tres veces la carga de todos los elementos que integran la línea, más el peso correspondiente a un manguito de nieve de 10 centímetros de diámetro, salvo en los casos en que por las condiciones climatológicas no sea preciso tener presente los depósitos de nieve.

El empotramiento de los apoyos se determinará en armonía con las condiciones del terreno y con la resistencia de aquéllos, para evitar el hundimiento de los mismos o su cambio de posición.

En todos los cambios de dirección de más de 20°, los

apoyos irán empotrados en un macizo de hormigón, sea cualquiera la naturaleza del terreno que los soporte.

En los trazados sobre vías de comunicación, de cada cinco apoyos, al menos uno irá empotrado en macizo de hormigón.

ART. 38. Dada la naturaleza de los conductores, dentro de las exigidas en el artículo 32, no se admitirán para las líneas aéreas secciones menores de 7 milímetros cuadrados, supuestos los conductores de cobre de más de 40 kilogramos de resistencia a la tracción. En los sitios de tránsito, el mínimo será de 10 mm^2. Para los demás metales, la sección mínima deberá calcularse con el mismo coeficiente de seguridad.

En relación con la resistencia mecánica se tendrá en cuenta la temperatura mínima de la región en que se sitúe la línea, no admitiéndose que el material de los conductores deba estar sometido a esfuerzos superiores a 1/5 del de rotura.

La flecha de los vanos de la línea se calculará dentro de las condiciones de resistencia para el material que quedan señaladas, teniendo en cuenta el peso del conductor más la acción del viento, supuesta la presión de 125 kilogramos por metro cuadrado antes indicada, tomando como superficie expuesta a la acción de aquél la longitud del conductor multiplicada por 0,70 del diámetro.

En las regiones en que por las condiciones climatológicas sean de temer depósitos de nieve sobre los conductores, se calcularán éstos teniendo en cuenta la acción del viento, y, separadamente, suponiendo que pueda la nieve formar un manguito de 10 centímetros de diámetro; cuyo peso debe tomarse en consideración en vez de la dicha acción del viento. De los dos cálculos, acción del viento y peso de la nieve, se adoptará el que arroje resultados más desfavorables. En el caso de regiones excepcionalmente frías, se supondrá de 20 centímetros el diámetro del manguito de nieve.

La separación de los conductores en las líneas aéreas se determinará en relación con la tensión del servicio y la longitud de los vanos. Para baja tensión, hasta 50 m. de vano, la separación no será inferior a 0,25 metros; para media, 0,50, y para alta tensión hasta 15000 volts, 0,75. Para mayores longitudes de vano, por cada metro desde

50 hasta 100, se aumentará la separación un centímetro, y para tensiones superiores a 15000 volts, por cada 1000 volts se aumentará medio centímetro sobre lo que la longitud del vano exija. Para vanos superiores a 100 m. y tensiones superiores a 50000, se hará un estudio que justifique, en cada caso, la separación de los conductores.

Cuando los conductores de la línea estén a la misma altura y suspendidos por aisladores dispuestos en cadena, la distancia señalada se aumentará en el 70 por 100 del largo del péndulo formado por los aisladores.

El empalme de los conductores se efectuará por cualquiera de los sistemas en uso, aplicándolos, en cuanto a seguridad se refiere, en armonía con los vanos y sección del conductor, sin que dicho empalme constituya un punto débil de la línea. Cuando los empalmes no deban sufrir esfuerzo de tracción, su resistencia podrá ser inferior.

La retención de los conductores se efectuará por hilo que nunca será más duro que ellos, y que no pueda formar por su contacto con éstos par voltaico.

Los aisladores de las líneas aéreas podrán ser de porcelana, vidrio u otros materiales de análogas condiciones dieléctricas y mecánicas, siempre que no sean de temer accidentes por su fragilidad o posible deformación producidos por los movimientos propios de los conductores. La resistencia mecánica de los aisladores será tal que no constituyan bajo este aspecto un elemento débil del conjunto de la línea.

Antes de ponerse en servicio los aisladores, deberán ser ensayados eléctricamente, en seco y con lluvia de 3 milímetros por minuto y una inclinación de 45° con la vertical, conforme a lo dispuesto en el artículo 33.

En las zonas que sean de temer depósitos salinos o de polvo que perjudiquen el aislamiento, deberá ser estudiado éste en armonía con la importancia del inconveniente señalado.

Las condiciones mecánicas de los soportes, brazos, ménsulas, travesaños y crucetas, serán calculadas con los mismos coeficientes de resistencia que las de los apoyos.

Art. 39. Cuando el cruce de una línea aérea sobre un inmueble, cercado, vía, etc., se haga con cable de 50 o más mm^2 de sección y de resistencia mecánica superior a 40 kilogramos por mm^2, el cruce constituirá una solución

de continuidad en la línea, por lo que a su tensión mecánica se refiere. Cada apoyo está provisto de dos aisladores por fase en el sentido de la línea; habrá un conductor de la longitud del cruce, cuyos extremos estarán sujetos en cada lado a uno de estos dos aisladores; en el otro aislador se hará terminación de línea; se unirán por un puente sin tensión mecánica entre los aisladores, los hilos de la línea con el de cruce, consiguiéndose de esta manera que en el vano de cruce los conductores no estén sometidos en ningún caso al esfuerzo de tracción de los dos vanos inmediatos.

Cuando el cruce se efectúe con conductor menor de 50 mm^2, irá unido a otro cable de acero galvanizado de 25 mm^2, o mayor sección, atados ambos directamente a distancias máximas de 1,50 metros, soldándose las ataduras.

El cable fiador irá sujeto en ambos apoyos del cruce en aisladores de retención independientes de los que soporten el conductor, de manera que no pueda resultar un esfuerzo que tienda a arrancar el aislador del soporte. La retención de los extremos del cable fiador se hará con la mayor seguridad posible.

Si el sistema de aisladores es colgado, el conductor sobre el cruce será siempre cable de cobre de 50 mm^2 de sección, por lo menos, y de 40 kilogramos de resistencia a la tracción por mm^2, no pudiéndose emplear suspensiones con una sola cadena de aisladores más que para esfuerzos de trabajo no superiores a 2000 kilogramos. En el caso de que el vano determine por su longitud esfuerzos de tracción mayores, se aumentará proporcionalmente el número de suspensiones.

Los vanos inmediatos al cruce terminarán en cada lado, en otro aislador por lo menos, independiente del que sujeta al cable del cruce. Si sólo hay un aislador en cada lado ambos estarán colocados en el mismo plano vertical y en la misma dirección de la línea. La unión eléctrica entre el conductor del cruce y los vanos inmediatos se efectuará por otro colocado de modo que no soporte el menor esfuerzo de tracción de parte de aquéllos, quedando una solución de continuidad mecánica en el conductor.

La línea no formará ángulos en los apoyos del cruce, más que en casos de necesidad muy justificada.

Los postes o apoyos del cruce se colocarán, siempre que

sea posible, en terreno firme, fuera de rellenos o terrenos movedizos; cumpliéndose este requisito se aproximarán lo más posible, en cuanto no se restrinja o entorpezca el tránsito, a las márgenes de la vía que se trate de cruzar, a fin de reducir el vano del cruce a la menor distancia posible.

Para mayor seguridad, los postes de cruce serán de material que no se pudra o corroa fácilmente, y se sujetarán al terreno por un macizo de hormigón que asegure su estabilidad.

La altura de los conductores será suficiente para que el conductor más bajo quede por lo menos 6 metros sobre la parte más alta de la vía que se cruza; si se trata de algún caso especial de cruce de ferrocarril, carretera u otra vía terrestre que por circunstancias también especiales exija mayor altura, será ésta la necesaria para no crear la menor dificultad o peligro para el tráfico ni para las reparaciones u otras operaciones que pudieran ser necesarias en la vía cruzada.

Si el cruce es de vía navegable, marítima o fluvial, los conductores deberán con toda holgura permitir el paso de los buques sin que pueda alcanzarlos su arboladura, y, en defecto de ésta, la altura de aquéllos será de 6 metros sobre la que corresponda a la más alta situación de la cubierta o piso de la embarcación en que puedan situarse las personas.

Si el cruce es sobre edificios o construcciones cualesquiera, y si se trata de líneas de alta o media tensión, la altura de los apoyos será tal que los conductores queden 4 metros más altos que los puntos más elevados en que bajo aquéllos pueda colocarse un hombre. Se fijará en sitio perfectamente visible la necesidad de cortar la corriente en las líneas, en caso de incendio, antes de emplear las mangas de riego para la extinción de aquél.

Los conductores de baja tensión se colocarán en forma que no dificulten el tránsito sobre los edificios para las reparaciones y los casos de incendio.

Los soportes de los conductores en los postes de cruce, cuando son éstos de madera u hormigón armado, deberán ser pasantes con tuerca al extremo opuesto del aislador; y en los postes de madera deberá evitarse el astillamiento armándolos con uno o más zunchos de hierro en la punta.

Cuando el cruce sea sobre edificios, fábricas, cercados,

lugares concurridos, ferrocarril, canal, río o ría de navegación, los apoyos del mismo deberán ser metálicos o de hormigón armado, y estar empotrados sólidamente en hormigón u obra de fábrica.

Estas reglas de carácter general deberán ser ampliadas y mejoradas con un estudio especial cuando el cruce deba ser mayor de 100 metros en un solo vano, por no poderse establecer apoyos intermedios.

Los cruces con caminos carreteros, de herradura y sendas de paso frecuente, se efectuarán sin otra precaución, colocando los dos postes de cruce lo más próximos posible en cuanto no sea un obstáculo para la circulación por la vía que se cruza; los postes dentro del sistema general, serán escogidos; si el ancho del camino es mayor de tres metros y fuese necesaria una mayor separación entre los apoyos, se aumentará la altura de seis metros señalada anteriormente para los conductores, tanto como se aumente el vano por encima de los tres metros.

Los cruces con otras líneas eléctricas, cuando éstas vayan a lo largo de carreteras, ferrocarriles, canales o vías navegables, se establecerán de modo que los conductores de la línea de menor tensión queden por bajo en el vano de cruce. Si el cruce de dos líneas eléctricas ha de hacerse fuera de una línea de comunicación, y una de aquéllas es de baja tensión, se efectuará colocando dos apoyos, uno a cada lado de la menor tensión, a distancia tal que los conductores de ésta queden a 50 ó más centímetros de los apoyos, y la altura de éstos tendrá que ser suficiente para que el conductor más bajo de la línea de tensión mayor, si se desprende de uno de sus extremos del vano de cruzamiento, quede por lo menos un metro más alto que el superior de la línea de menor tensión.

Los conductores de éstas deben sujetarse a aisladores colocados sobre travesaños que vayan de uno a otro apoyo de la línea superior, para dar mayor rigidez y seguridad al sistema.

La misma disposición se adoptará cuando el cruce sea de dos líneas de baja tensión, considerándose comprendidas en este caso las telegráficas y telefónicas.

Si el cruce es de una línea de media o alta tensión con otra de análogas condiciones, el orden de colocación será el indicado y los apoyos del cruce se colocarán a uno y

otro lado de la línea inferior, dejando entre los conductores de éstas y aquéllos una distancia de 1,50 metros.

La altura de dichos apoyos será tal que el conductor más bajo de la línea superior y el más alto de la inferior queden separados por una distancia de 25 por 100 de la que haya entre los apoyos. Además, en estos casos, los conductores de la línea superior serán cables de más de 25 mm^2 de sección.

Cuando la línea aérea cruce un monte o una masa de arbolado, para librar a los conductores del contacto de las ramas, se podrán cortar los árboles a mata rasa dejando un ancho libre de tres metros a uno y otro lado de la línea, para mantener el cual, el propietario de ésta tendrá derecho a efectuar la poda de las ramas que por su crecimiento reduzcan aquella distancia. Las indemnizaciones a que se refiere el artículo 20 se harán extensivas a todo el ancho de la faja de terreno afectado por esta servidumbre y al arbolado que deba desaparecer.

Sólo se admitirán en caso de necesidad justificada los trazados paralelos de dos líneas de transporte de media o alta tensión; su separación será de más de 10 metros en general; por excepción justificada podrá reducirse ésta, y a falta de otra solución, se admitirá su tendido sobre los mismos apoyos.

En el caso de que se empleen distintos, lo que debe siempre procurarse en todo el recorrido paralelo, los apoyos y demás elementos de ambas líneas tendrán doble resistencia y estabilidad que las exigidas para el resto de las líneas, a lo que se añadirá que los vanos sean de 25 por 100 menores del tipo normal, y en el empotramiento de los apoyos citados, asegurado con un macizo de hormigón. Si fueran precisas variaciones en los cruces o trazados paralelos, se efectuarán las necesarias para cumplir lo que queda dispuesto. Las variaciones de una línea o instalación preexistente, motivada por otra que se trata de establecer, serán ejecutadas por el propietario de la primera, a cuenta del de la segunda. En armonía con esto, toda línea deberá establecerse de modo que no entorpezca las servidumbres existentes, más que lo necesario para su instalación y modificaciones precisas.

Cuando se empleen los mismos apoyos para líneas de características distintas, aquéllos serán de altura suficiente para que la separación de los conductores sea la que con

carácter general se exige, quedando, además, entre el más bajo de la superior y el más alto de la inferior una diferencia de altura de 1,50 metros. Deberá también cumplirse la condición de que el conductor más bajo esté, en cualquier punto, a seis metros, al menos, de altura sobre el suelo.

Todas las líneas que vayan en los mismos apoyos, se considerarán, para los efectos de la explotación, conservación y seguridad en relación con las personas, a una tensión igual a la de la que la tenga más elevada.

Art. 40. El tendido de las líneas de transporte sobre vías públicas, y paralelamente a ellas, cuando están destinadas aquéllas al servicio directo de la energía para consumo público, se efectuará, por excepción justificada, a falta de otra solución, si se trata de líneas de alta tensión, y en tal caso, se tomarán las siguientes precauciones.

1.ª Los apoyos se situarán en los puntos de menor circulación y fuera de la parte destinada al tránsito rodado, dejando asimismo libres las cunetas, si las hubiere.

2.ª Los conductores serán cables de 25 milímetros cuadrados de sección por lo menos; las distancias de los apoyos serán a lo sumo de 25 metros, y, excepcionalmente, por razones que lo justifiquen, podrán llegar a 35 metros. Las condiciones de los apoyos, brazos, soportes, aisladores y conductores serán tales que ofrezcan garantías de estabilidad dobles de las consignadas con carácter general.

3.ª En el caso de que por no ser recta la vía, fuesen precisos trazados poligonales, los ángulos interiores no serán menores de 60 grados sexagesimales, y los apoyos se aproximarán lo necesario para que la proyección horizontal de los conductores no corresponda a la parte de vía destinada a la circulación.

Las condiciones de resistencia de los apoyos garantizarán su perfecta estabilidad y permanencia, y si para ello fueran precisas construcciones especiales, éstas se harán de modo que no dificulten la circulación ni las servidumbres preexistentes.

4.ª Los conductores de alta y media tensión, frente a fachadas de edificios habitados, se establecerán de modo que la separación de las ventanas y balcones, o sitios en que puedan colocarse las personas, sea tal que queden dos metros libres sobre el alcance de éstas.

5.ª En los recorridos de líneas de alta o media tensión

que correspondan a lugares urbanizados, o donde la circulación es frecuente, a la garantía anterior se unirá, para conductores de sección menor de 50 mm^2, la de asegurar éstos con cable fiador que produzca los mismos efectos indicados para los cruces, y si las variaciones de alimentación de la vía, las condiciones del terreno de sus márgenes, los edificios u otras causas obligan a efectuar cruces, su número se reducirá en lo posible, y en ellos se tomarán las mismas precauciones indicadas en el artículo 40, con carácter general para los mismos.

Cuando en una vía a lo largo de la cual se trate de tender una línea de transporte de alta tensión, existen otras líneas, telegráficas y telefónicas, el tendido de aquélla se hará en el lado opuesto de la vía al que se encuentren éstas (las telegráficas y telefónicas), y si existieran líneas de comunicación en ambas orillas, se efectuarán los traslados y variaciones necesarios para que todas las de esta clase queden al mismo lado de la vía. El traslado se efectuará por la entidad propietaria, a cuenta de la que quiera establecer la nueva línea eléctrica.

Cuando el trazado de una línea de transporte de corriente eléctrica de media o alta tensión deba ir, por circunstancias inevitables, total o parcialmente paralelo a conducciones telegráficas o telefónicas, la separación que se establezca entre aquéllas y éstas no será inferior a 10 metros. Para evitar en las últimas los efectos de inducción de las líneas de corriente alterna, se efectuará el cambio mutuo de posición de los conductores de las líneas de comunicación, o su alternación, de modo que queden éstas divididas en un número par de trozos o fracciones de igual longitud, si dichas líneas, telegráficas o telefónicas, son bifilares; y si la comunicación es unifilar, o existe más de una línea de un solo conductor, la variación de posición de los conductores se efectuará en la línea de transporte.

Si el ancho de la vía fuese inferior a 10 metros, se efectuarán las variaciones indicadas en el sentido horizontal, o en el vertical de la línea de transporte o de las líneas telegráficas o telefónicas. Cuando se trate de líneas de servicio de tracción, el trazado y situación de los conductores se ceñirá a las condiciones que la tracción exija.

En las líneas aéreas de baja tensión próximas a los edificios, o colocadas sobre brazos o palomillas sujetos a

sus muros, los conductores estarán suficientemente separados para que no sean tocados inadvertidamente por personas que puedan asomarse a las ventanas, balcones, terrazas, etc., no excluyendo esta condición que los conductores estén aislados.

Las derivaciones para la alimentación de receptores de energía se efectuarán arrancando de un apoyo o instalación especial hecha en la línea de origen, nunca de vano alguno, y si necesariamente han de tener parte de su recorrido al alcance de las personas, en esa parte, además del aislamiento de los conductores, irán éstos protegidos por una cubierta que impida el que inadvertidamente puedan ser tocados, y sufran los efectos de la humedad.

Si la línea derivada es para corriente de media o alta tensión, se situarán los conductores en forma tal que conservando la altura de 6 metros sobre el suelo, queden, como se ha indicado para las líneas, 2 metros sobre los puntos del edificio a que puedan llegar las personas. Cuando sea imposible esa distancia se cubrirán los conductores con una pantalla metálica, o irán en forma de cable armado, y en ambos casos la cubierta metálica se pondrá en comunicación con tierra. En las derivaciones podrá reducirse la sección de los conductores, supuestos de cobre, a 5 mm^2 y a la necesaria equivalente en los demás metales, siempre que en ellas no haya vanos de más de diez metros.

En el arranque y terminación de las líneas de gran longitud, y a distancias máximas de 20 kilómetros, para su seccionamiento deberán establecerse cortacircuitos e interruptores, o desconectadores que al abrir pongan en comunicación con tierra la línea o parte de ella que se trate de separar del circuito eléctrico. Si la tensión de servicio es mayor de 15000 volts, o la corriente pasa de 200 amperes en las de menor tensión, se establecerán interruptores con exclusión de desconectadores. La misma precaución se tomará con una línea mixta, al paso de aéreas a subterráneas.

Si hay razones de importante economía, o dificultades justificadas que se opongan al establecimiento de líneas independientes, podrá fijarse la de comunicación en los mismos apoyos que en la de trabajo, siempre que se trate de comunicación directa sin derivaciones permanentes.

En tal caso el conductor superior de la línea telefónica quedará 1,50 metros más bajo que el inferior de la de trabajo cuando la longitud del vano no sea superior a 30 metros; para mayores vanos, por cada metro se aumentará aquella separación un centímetro, tomándose siempre la precaución de que la flecha de la línea telefónica sea igual o mayor a la de la línea superior. La línea telefónica así establecida se considerará como de alta tensión para los efectos de este Reglamento, relacionado con la seguridad de las personas y de las cosas.

Las partes metálicas de las estaciones telegráficas o telefónicas, que están en comunicación eléctrica con los conductores de la línea, podrán estar descubiertas desde 2,5 metros del piso para arriba, pero deberán protegerse desde esta altura hasta el suelo.

CAPÍTULO III

De las aplicaciones a tranvías y demás servicios

ART. 41. Las instalaciones para tranvías y ferrocarriles de tracción eléctrica serán objeto de reglas especiales que se consignarán en sus condiciones, ya sea que se utilicen hilos aéreos de trabajo con trole ordinario o automotor, o ya sea que se apliquen rieles o placas sobre el suelo para el suministro de energía eléctrica, entre las cuales se pondrán necesariamente las siguientes:

Cuando se trate de defender el hilo de trabajo contra la caída de los de telégrafos, teléfonos u otra instalación análoga en tranvías con trole ordinario y rieles de retorno de corriente, se adoptará uno de los procedimientos que a continuación se expresan:

1.° Un hilo protector de cuerda metálica o alambre, independiente de los hilos de trabajo, tendido paralelamente sobre cada uno de los mismos y situado en un plano vertical, siempre que sea posible, a juicio de la Administración o su agente, o bien dos hilos en planos verticales distintos a un lado y a otro y más altos que el de trabajo.

2.° Si el hilo protector único no pudiera establecerse con arreglo a la disposición anterior, podrá colocarse en otro plano vertical paralelo al hilo del de trabajo, pero

en tal disposición que el de telégrafo o teléfono caído tenga que tocar precisamente al protector superior o a la vez a éste y al de trabajo.

3.° El hilo o hilos protectores podrán servir para dos hilos de trabajo, siempre que cada uno de éstos satisfaga las condiciones anteriores.

4.° Se establecerán el hilo o hilos protectores en todas las alineaciones rectas y aun en las curvas de gran radio en que puedan colocarse satisfaciendo las precedentes disposiciones.

5.° El hilo o hilos protectores deberán estar en buena comunicación con los rieles de cien en cien metros aproximadamente.

6.° La sección de hilo o hilos protectores, con arreglo a su conductibilidad, deberá ser tal, que al poner en contacto suyo y en el del hilo de trabajo un hilo de 11 décimas de milímetro de diámetro, se funda éste inmediatamente, sin que por el paso de la corriente el protector se resienta de un modo notable.

7.° Será de cargo de la empresa de tranvías colocar en lo posible el hilo o hilos protectores, sin que el trole, al descarrilar, toque a los mismos, y mucho menos a éste y al de trabajo a la vez, para evitar la formación de un cortocircuito.

8.° En toda instalación en que los «feeders» sean aéreos, sigan o no la dirección de los hilos de trabajo, se considerarán como éstos para la protección a que se refieren estas condiciones.

9.° En las curvas de poco radio y trozos en que no pueda colocarse un hilo o hilos protectores en los términos anteriores por estar suspendidos los de trabajo por tirantes, se colocará la defensa o protección aisladora inmediatamente por encima del hilo de trabajo.

10. En cuanto sea posible, debe evitarse que los hilos telegráficos y telefónicos sigan una dirección casi paralela a plomo de los de trabajo; pero si no pudiera evitarse, será preferible en tal trozo el empleo de una defensa o protección aisladora, colocada inmediatamente por encima del hilo de trabajo.

11. Cuando los hilos de trabajo se hallen sostenidos por tirantes, para evitar el corrimiento de los telefónicos o telegráficos sobre los mismos, y ponerse en contacto con

los de trabajo, deberán los tirantes estar armados de ganchos de retención.

12. Para que produzcan efectos los medios indicados de defensa, es preciso que se ejecuten con extremada solidez y esmero, y deberán sujetarse a una exquisita vigilancia.

ART. 42. En los tranvías en que el suministro de energía eléctrica se efectúe por el sistema de placas de contacto o de un tercer riel colocado en el centro de la vía, lo mismo que en otros sistemas ensayados con cable conductor bajo el vuelo de aceras y andenes, o bien en piezas acanaladas con bordes aisladores, deberán disponerse todos estos elementos de modo que estén protegidos del contacto de los alambres a que se refiere el artículo anterior y eviten todo lo posible accidentes en la circulación pública sin impedir o perjudicar su tránsito.

ART. 43. Cuando se trate de tranvías o carruajes con trole automotor, se aplicarán las disposiciones del artículo 41, sin que por ningún concepto pueda utilizarse la tierra para retorno de la corriente, sino por el circuito cerrado de los cables retenedores del carretón automotor en el caso de empleo de corriente continua, y entonces el hilo protector deberá hallarse en comunicación con el de retorno.

Si se aplican corrientes alternas transformadas en el mismo carretón, se tendrán en cuenta las mismas prevenciones para evitar derivaciones por tierra, debiendo recomendarse el uso de llantas neumáticas en las ruedas, que además de atender a este efecto, conservarán mejor la parte de vías destinadas a la rodadura.

ART. 44. Para que lo prescrito en los tres artículos precedentes pueda producir todo su efecto, es menester también que las líneas e hilos telegráficos y telefónicos satisfagan a los medios que concurran a igual fin, y siempre que crucen vías y calles por donde circule un tranvía, además de efectuarlo lo más normalmente posible, deberá sujetarse a una de las condiciones siguientes:

1.ª De estar soportados los hilos y sujetos sobre dos casas fronterizas de la calle o apoyos cuando la anchura de las vías sea tal que, aun rompiéndose el hilo, no pueda alcanzar a la de trabajo o tranvía; en este caso el hilo puede ir desnudo entre ambos soportes.

2.ª Efectuar el cruce con hilo revestido de un buen aislamiento entre los dos soportes que los comprenden.

3.ª Emplear hilo desnudo entre ambos soportes mencionados, a condición de que en cada uno de ellos se fije una varilla horizontal de cobre en buena comunicación con tierra con un hilo protector que satisfaga a la condición sexta del artículo 41; dicha varilla deberá ser tocada por el hilo telefónico o telegráfico al romperse éste.

Convendrá estudiar si en algunos casos particulares de cruces de hilos telefónicos sobre los de trabajo de los tranvías, será conveniente emplear para aquéllos alambre bimetálico, con el fin de dificultar la rotura de dichos conductores y su contacto con los segundos, sin perjuicio de todas las demás prevenciones que se detallan en este artículo.

ART. 45. Las compañías de tranvías eléctricos establecidas al presente o que en lo sucesivo se constituyan, tendrán obligación de ensayar en sus líneas los aparatos que teóricamente ofrezcan alguna garantía, deberán seguir todos los adelantos respecto a la protección del hilo de trabajo y demás medidas de seguridad para adoptar inmediatamente las que la experiencia demuestre ser más eficaces que las conocidas hasta ahora y propuestas en este Reglamento.

Las empresas de telégrafos y teléfonos, a su vez, evitarán el abuso de salvar con sus líneas grandes vanos, para lo cual observarán las prescripciones que sobre el particular dicte el personal encargado de la inspección de sus redes.

ART. 46. En las instalaciones de tracción por corriente continua que atraviesen zonas donde haya establecidas tuberías metálicas de agua, gas, etc., el circuito de retorno por los carriles deberá satisfacer a la condición de que la caída de tensión en el mismo, dentro de cada una de las zonas expresadas, no exceda de un volt por kilómetro con la intensidad media correspondiente al servicio normal. Para obtener esta conductibilidad suficiente del circuito de retorno, se adoptarán las medidas necesarias en cuanto a conexiones de cobre en las juntas, soldaduras de éstas, «feeders» de retorno y conexiones transversales entre filas de carriles.

En las instalaciones o parte de instalación de tracción de corriente continua donde no hubiese tuberías metálicas o en las instalaciones por corriente alterna, el circuito de retorno solamente tendrá que satisfacer a la condición

de no perturbar las comunicaciones telegráficas, telefónicas u otras análogas que existan.

Art. 47. Las instalaciones de aplicación de energía eléctrica conducida a poblados y zonas que se hallen sujetos a reglas especiales, se someterán a las disposiciones que éstas determinen, lo mismo que las relativas a edificios de carácter público, como teatros y locales destinados a espectáculos, etc., al igual de explotaciones industriales, de minería y otras análogas en que rigen reglamentos especiales, por cuyo cumplimiento vela la Administración por medio de sus agentes.

Las instalaciones para alumbrado, calefacción, motores industriales y demás usos en domicilios privados, sin que atraviesen el recinto de los mismos, podrán efectuarse libremente sin intervención de la Administración, mientras no afecten a la seguridad personal, incendios u otros accidentes cuyos efectos puedan extenderse a otros edificios colindantes, o al exterior destinado al tránsito público. A petición de parte, podrá, sin embargo, la Administración, mediante la Verificación oficial de contadores eléctricos, inspeccionar el aislamiento de los conductores y comprobar los contadores y demás aparatos de medición del suministro y de seguridad personal, con arreglo a las facultades propias de la misma para verificarlos y contrastarlos con sujeción a las disposiciones vigentes.

Art. 48. Para el cumplimiento de lo dispuesto en la última parte del artículo anterior, los dueños o empresas de suministros de energía eléctrica dictarán reglas e instrucciones para la instalación y uso en domicilios privados, y de ellas se entregarán dos ejemplares a la Administración para su examen por la Verificación oficial de contadores eléctricos, en cumplimiento del mismo artículo 1.° de las Instrucciones para la verificación oficial de contadores, la cual podrá hacer sobre aquéllas las observaciones que estime oportunas respecto a la seguridad de las personas y cosas y, en caso de no ser aceptadas, el ministro podrá imponer cuantas estime indispensables o necesarias, quedando los dueños, si no las adoptaren y hubiere lugar a ello, sujetos a la aplicación del Código Civil y Penal, por resultas de imprudencia temeraria.

ÍNDICE

CAPÍTULO PRIMERO

Centrales de corriente continua

CAPÍTULO II

Centrales de corriente alterna

CAPÍTULO III

Transformación de corriente por transformadores estáticos

CAPÍTULO IV

Transformación de corriente por rectificadores y transformadores giratorios

CAPÍTULO V

Redes subterráneas

CAPÍTULO VI

Redes aéreas

APÉNDICE

Reglamento para instalaciones eléctricas, en cuanto afectan a la seguridad pública y a la servidumbre forzosa de paso

Págs.

Guía práctica de Topografía usual, por E. LIGER. Un volumen de 152 páginas, de 20 × 13 cms., con 56 grabados.

Tratado de Física *para los cursos de las Escuelas técnicas superiores y para los de ampliación,* por O. MURANI. Dos volúmenes de 25 × 16 cms.

I. **Mecánica, Acústica, Termología.** 694 págs., con 592 grabados.

II. **Optica, Electricidad.** 910 págs., con 803 grabados.

Elementos de Ciencias físicas y naturales, por el doctor E. FONTSERÉ. 3.ª ed. Un volumen de 294 págs., de 20 × 14 cms., con 774 grabados.

Compendio de Física y Química, por J. KLEIBER y el Dr. J. ESTALELLA. 2.ª ed. Un volumen de 396 págs., de 20 × 13 cms., con 375 grabados y una lámina en color.

Tratado de jabonería, por el Dr. C. DEITE, ampliado por el Dr. W. SCHRAUTH, profesor de la Universidad de Berlín. Un volumen de 800 págs., de 25 × 16 cms., con 171 grabados.

Tratado popular de Física. *Manual al alcance de todo el mundo, con numerosas figuras, ejemplos y problemas resueltos, de aplicación a la industria y a la vida práctica,* por los Dres. KLEIBER y KARSTEN. 4.ª ed., 3.ª tirada. Un volumen de 590 págs., de 20 × 13 cms., con 538 grabados y una lámina en color.

Fabricación de conservas alimenticias. *Manual práctico para fabricantes, agricultores y particulares,* por L. E. ANDÉS. Un volumen de 588 págs., de 20 × 13 cms., con 67 grabados.

Tratado de lechería, por el Dr. FLEISCHMANN, profesor de la Universidad de Gotinga. Un volumen de 746 págs., de 25 × 16 cms., con 63 grabados.

Tratado de Aritmética práctica, por J. PRATS AYMERICH. 2.ª ed. Un volumen de 434 págs., de 20 × 13 cms., con 10 grabados.

Técnica del Dibujo, *o sea descripción de los instrumentos que se emplean en la práctica del Dibujo, modo de usarlos y explicación breve y sencilla de los procedimientos más convenientes para facilitar su labor a los dibujantes,* por A. COMMELERÁN. Un volumen de 204 págs., de 25 × 16 cms., con 78 grabados.

Elementos de Matemáticas, *para uso de las Escuelas de Comercio y de Artes e Industrias y para los adultos que deseen completar su instrucción,* por L. TRIPARD. Un volumen de 434 págs., de 20 × 13 cms., con 338 grabados.

A B C de la Fotografía, por el Dr. L. SASSI. Un volumen de 228 páginas, de 20 × 13 cms., con 92 grabados.

Formulario del ingeniero. *Manual práctico para los ingenieros, mecánicos y constructores,* por E. GARUFFA, ingeniero. Un volumen de 700 págs., de 20 × 13 cms., con 975 grabados y 240 tablas.

Motores de gas, de alcohol y de petróleo, por el doctor V. CALZAVARA. 3.ª ed. Un volumen de 430 páginas, de 20 × 13 cms., con 159 grabados.

Recetario del automovilista. *Colección práctica de procedimientos, consejos, secretos de taller y reparaciones de urgencia,* por L. BAUDRY DE SAUNIER. Un volumen de 756 págs., de 18 × 13 cms., con 244 grabados y cuatro gráficas.

Manual del tornero mecánico. *Guía práctica para la construcción de tornillos, engranajes y ruedas helicoidales,* por S. DINARO. 2.ª ed., aumentada. Un vol. de 240 págs., de 20 × 13 cms., con 59 grabados.

Manual del mecánico, *para uso de los obreros mecánicos, jefes de taller, montadores, metalúrgicos, electricistas y encargados de máquinas de vapor,* por el ingeniero E. GIORLI. 5.ª ed., ampliada. Un volumen de 612 págs., de 20 × 13 cms., con 374 grabados.

El motor de explosión, por E. PETIT, ingeniero. Un volumen de 566 páginas, de 20 × 13 cms., con 198 grabados.

